

## **Data storage system by writing data in form of strip-shaped gratings when coherently interference occurs between beams**

**Patent number:** DE10134769

**Publication date:** 2002-04-11

**Inventor:** NORDMEYER PHILIPP (DE); KOCK MATTHIAS (DE); ORLIC SUSANNA (DE); ULM STEFFEN (DE); EICHLER HANS JOACHIM (DE); MUELLER-WIRTS THOMAS (DE)

**Applicant:** EICHLER HANS JOACHIM (DE)

**Classification:**

- **international:** G11B7/0065

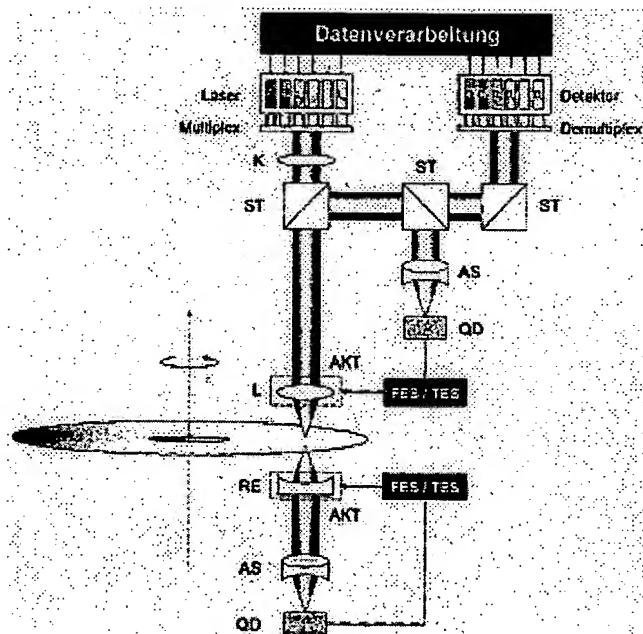
- **European:** G11B7/0065, G11B7/125L

**Application number:** DE20011034769 20010713

**Priority number(s):** DE20011034769 20010713; DE20001034975 20000713

### **Abstract of DE10134769**

The system stores data in a storage medium that comprises two opposing coherent beams. Gratings can be written in at least one region of the storage medium when coherent interference occurs between the beams. The storage medium is displaced relative to the beams. The data are written in the form of strip-shaped gratings. An independent claim is included for a method of writing data in a storage medium.



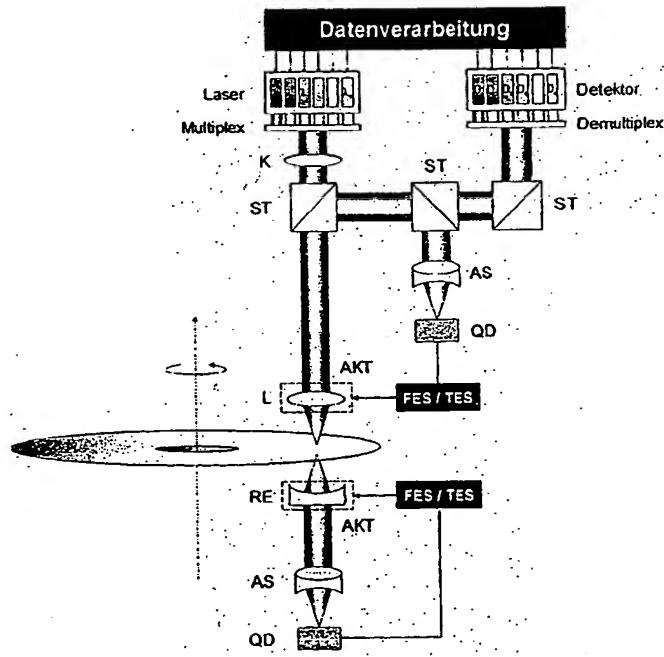
Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(12) **Offenlegungsschrift**  
(10) **DE 101 34 769 A 1**(66) Innere Priorität:  
100 34 975. 7 13. 07. 2000(71) Anmelder:  
Eichler, Hans Joachim, Prof. Dr., 12105 Berlin, DE(21) Aktenzeichen: 101 34 769.3  
(22) Anmeldetag: 13. 7. 2001  
(43) Offenlegungstag: 11. 4. 2002(72) Erfinder:  
Eichler, Hans Joachim, Prof. Dr., 12105 Berlin, DE;  
Orlic, Susanna, Dipl.-Phys., 10709 Berlin, DE; Ulm,  
Steffen, Dipl.-Phys., 10781 Berlin, DE; Kock,  
Matthias, Dipl.-Phys., 10405 Berlin, DE;  
Müller-Wirts, Thomas, Dr., 30559 Hannover, DE;  
Nördmeyer, Philipp, Dipl.-Phys., 10245 Berlin, DE**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**(54) **Mikroholographische Datenspeicher mit dreidimensionalen Streifengittern**

(57) Die Erfindung betrifft ein optisches Speichersystem und -verfahren, die es ermöglichen, die Daten bit-orientiert als dreidimensionale streifenförmige Reflexionsgitter dynamisch in eine photoempfindliche Schicht einzuschreiben und auszulesen. Die Gitterentstehung erfolgt holographisch mittels stark fokussierter Laserstrahlen und ist räumlich in allen Richtungen auf einen Submikrometerbereich begrenzt. Zum Einschreiben wird der Laserstrahl in die Speicherschicht fokussiert und mit einer reflektierenden Einheit so abgebildet, dass der einfallende und reflektierte Strahl mit entgegengesetzten Ausbreitungsrichtungen sich exakt überlagern und die gemeinsame Strahltaille sich in einer bestimmten Tiefe der Speicherschicht befindet. Bei der Aufnahme wird die Speicherschicht senkrecht zur Strahlachse bewegt. Somit entstehen streifenförmige Mikrogitter unterschiedlicher Länge entsprechend der Schreibzeiten. Das Auslesesignal entsteht durch Beugung unter Bragg-Bedingungen. Über Wellenlängen- und Tiefenmultiplexing wird das gesamte Volumen des Speichermediums mehrfach genutzt. Multiplexgitter werden mit den Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge überlappend und simultan eingeschrieben und separat voneinander mit entsprechenden Wellenlängen ausgelesen. Die Daten sind in mehreren unabhängigen untereinander liegenden Ebenen innerhalb der photoempfindlichen Schicht gespeichert, die mit stark fokussierten Laserstrahlen separat adressiert werden.

Zur automatischen Fokusregelung ...



## Beschreibung

## Angabe des technischen Gebiets

[0001] Die Erfindung betrifft ein Datenspeicherungssystem zur Speicherung von Daten in einem Speichermedium, wobei die Information bitorientiert in Form mikroskopischer Reflexionsgitter in einer dünnen photoempfindlichen Schicht gespeichert wird.

[0002] Die Gittererzeugung erfolgt holographisch, mittels stark fokussierter Laserstrahlen in einem räumlich begrenzten Bereich. Das Speichermedium wird beispielsweise in Form einer Disk realisiert, indem die photoempfindliche Schicht auf ein optisches Disksubstrat aufgetragen und die Daten in einer spiralförmigen Spur kodiert werden. Bei der Aufnahme wird die Speicherschicht durch die Diskrotation senkrecht zur Laserstrahlachse bewegt, so dass die Gitter dynamisch als Strichen mit beliebiger Länge induziert werden.

[0003] Das Auslesesignal entsteht durch Beugung eines Laserstrahls an den eingeschriebenen Gittern unter Bragg-Bedingung. Durch die Bragg-Selektivität mikroholographischer Volumengitter wird es möglich, mehrere Gitter mit Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge im selben Volumenelement zu schreiben und sie separat auszulesen. Die dreidimensionale, stark lokalisierte Gitterstruktur ermöglicht das Ausnutzen des ganzen Volumens des Speichermediums, indem die Daten in mehreren diskreten Ebenen innerhalb der Speicherschicht abgelegt werden. Die hohe Speicherkapazität resultiert erfindungsgemäß aus einer Kombination von Wellenlängenmultiplexing und Tiefenmultiplexing. Die Speicherdichte erhöht sich proportional zum Multiplexfaktor kombinierter Multiplexmethoden. Beim parallelen Einschreiben und Auslesen mehrerer Gitter mit Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge lassen sich die Datentransferraten proportional zum Faktor des Wellenlängenmultiplexing steigern.

[0004] Hinsichtlich der Speicherleistung des Systems ist es entscheidend, dass mit dynamisch induzierten Gittern als langgezogenen Streifen eine Flächenstruktur gespeicherter Daten realisiert wird, welche es ermöglicht, optimierte Modulations- und Codierungsverfahren in das Multiplexkonzept zu integrieren. Dabei repräsentiert eine Streifenkante die binäre Eins, der Abstand zwischen zwei Streifenkanten gibt die Anzahl der Nullen zwischen zwei Einsen an. Die Implementierung fortschrittlicher Verfahren zur Codierung und Fehlerkorrektur führt sowohl zu einer größeren Datensicherheit als auch zu einer höheren Speicherdichte.

[0005] Das erfundene Speicherfahren kombiniert die Vorteile der ausgereiften Technologie konventioneller optischer Disks mit dem holographischen Ansatz. Somit werden die Speicherleistungen sowohl bisheriger optischer Flächen speicher als auch holographischer Volumenspeicher übertragen.

## Stand der Technik

[0006] Der Erfindung geht die Entwicklung der weitverbreiteten, zweidimensionalen optischen Datenspeichersysteme CD und DVD voraus. Wesentliche Faktoren für den Erfolg der CD Technologie waren Modulations- und Codierungsverfahren, die die Fehlerrate und Speicherdichte optimieren. Darauf aufbauend konnten die Systeme preiswert und in großen Stückzahlen produziert werden. Jedoch ist die maximale Speicherkapazität konventioneller optischer Disks physikalisch durch das Auflösungsvermögen des optischen Systems begrenzt. Das Beugungslimit ist annähernd durch den Quotienten aus Fläche des Mediums (A) und Wel-

lenlänge des verwendeten Lasers ( $\lambda$ ) gegeben als  $A/\lambda^2$ .

[0007] Es ist bekannt, dass dieses Kapazitätlimit durch Volumenspeicherung überwunden werden kann, indem die Daten als Volumenhologramme durch Zweistrahlinterferenz

5 in einer dicken Speicherschicht abgelegt werden. In diesem Fall gilt für die Beugungsbegrenzte maximale Speicherkapazität  $V/\lambda^3$ , wobei V das Volumen des Speichermediums bezeichnet. Verschiedene Multiplexmethoden können in einem Volumenspeichersystem implementiert werden. Holographische Speicher können seiten-orientiert oder bit-orientiert realisiert werden. In seiten-orientierten Systemen werden die Daten durch den Einsatz von räumlichen Lichtmodulatoren seitenweise, d. h. als Hologramm eines Arrays von Bits durch das Volumen des Mediums gespeichert. Verschiedene Anordnungen zur seiten-orientierten holographischen Speicherung wurden präsentiert, z. B. [PCT/US88/04713, Int. Publ. No. WO90/08350]. Trotz intensiver Entwicklung und eindrucksvoller Verbesserungen der Systemleistung sind die technologischen Schwierigkeiten derartiger seiten-orientierter Speichersysteme nach wie vor so immens, dass bis heute kein System die Marktreife erreichen konnte.

[0008] Alternativ zu seiten-orientierten holographischen Speichersystemen sind auch verschiedene Konzepte für die bit-orientierte dreidimensionale optische Speicherung vorgeschlagen und prinzipiell nachgewiesen worden. Eine optische Anordnung zum Speichern von Daten auf einem scheibenförmigen Datenträger, die dadurch gekennzeichnet ist, dass das Volumen der Schicht mehrfach durch überlagernde 30 Reflexionshologramme genutzt wird, ist in [DE 195 34 501 C2] beschrieben worden. Diese Anordnung basiert auf einer Kombination von Wellenlängen- und Winkelmultiplexing, d. h. mehrere Hologramme sollen im selben Volumen abgelegt werden mit Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge und Neigung. Die Information wird allein durch das Vorhandensein oder Fehlen eines solchen Hologramms an der entsprechenden Stelle des Datenträgers gespeichert.

[0009] Wie in [DE 195 34 501 C2] ausgeführt, sind reine 40 Volumenspeicher bisher sehr aufwendig und teuer. Die technologischen Schwierigkeiten stehen der Entwicklung eines marktreifen Produktes im Wege.

[0010] In Anlehnung an den Erfolg von CD/DVD Systemen bietet die bitorientierte dreidimensionale Datenspeicherung den aussichtsreicherem Ansatz. Jedoch wurde auch hier noch kein konkurrenzfähiges Konzept vorgeschlagen. Wie Bild 7a verdeutlicht, liefert bei der in [DE 195 34 501 C2] beschriebenen Verschlüsselung der Eins durch das Vorhandensein eines Hologramms die Größe des Hologramms die maximale Frequenz des Auslesesignals. Verglichen mit dem CD/DVD Codierungsverfahren resultieren daraus Verluste bezüglich der Flächen Speicherdichte, sowie der Datensicherheit und Schreib- und Lesegeschwindigkeit.

[0011] Des weiteren wird die Speicherung von digitalen 55 Daten als Mikrohologramme, die in einer ähnlichen Reflexionsanordnung aufgenommen werden, vorgestellt [PCT/US99/01763 Int. Publ. No. WO 99/39338]. Die Mikrohologramme werden im Überlappbereich zweier Strahlen unter Verwendung verstellbarer Fokussiereinheiten in mehreren Tiefen des Speichermediums eingeschrieben.

[0012] Die flächenbezogene Begrenzung der Speicherkapazität konventioneller optischer Diskspeichersysteme wie CD und DVD wird durch holographische Volumenspeicherung prinzipiell aufgehoben und auf ein größeres, volumenbezogenes Limit verschoben. Allerdings liefern weder die seiten-orientierten noch die bit-orientierten bisher vorgeschlagenen Volumenspeicher ein kommerziell konkurrenzfähiges Konzept.

## Aufgabenstellung

[0013] Es ergibt sich die Aufgabenstellung, ein Speicher- verfahren und eine dazugehörige Anordnung zu erfinden, welche die Vorteile der optischen Volumenspeicherung mit den ausgereiften und optimierten Modulations- und Codierungstechniken verbindet und so zu maximalen Speicherleistungen bei Minimierung der Entwicklungs- und Produktionskosten kommt. Dabei sollen die Daten bit-orientiert auf einer auswechselbaren Disk gespeichert werden.

## Lösung

[0014] Als Speichermedium wird ein photosensitives holographisches Material verwendet, das Bestandteil eines auswechselbaren Datenträgers ist. Vorzugsweise wird eine auswechselbare optische Disk verwendet. Besonders geeignet für diese Anwendung sind dünne Photopolymersfilme, die preisgünstig in Massenproduktion hergestellt werden können. Mittlerweile sind photosensitive Polymere erhältlich, die auch als bis zu 1 mm dicke Filme hergestellt werden, in welchen eine Änderung optischer Eigenschaften des Materials dauerhaft, chemisch und ohne zusätzliche Nachbehandlung durch Belichtung induziert wird. Mit neuartigen flüssigkristallinen und photorefraktiven Polymermaterialien wird auch die reversible Speicherung möglich. Damit können erfundungsgemäß sowohl einmalig beschreibbare (recordable) als auch wiederbeschreibbare (rewritable) Speichermedien realisiert werden.

[0015] In Bild 1 wird ein System konzipiert, das einen Lösungsweg zur oben definierten Aufgabenstellung bietet. Das Einschreiben und Auslesen der Information erfolgt ähnlich wie in konventionellen optischen Diskspeichersystemen mittels stark fokussierter Laserstrahlen. Zum Einschreiben wird der Laserstrahl in das Speichermedium fokussiert und durch eine reflektierende Einheit dahinter zurückreflektiert (Bild 1). Durch Interferenz des einfallenden mit dem reflektierten Strahl entsteht ein Intensitätsmuster, welches im photoempfindlichen Medium eine entsprechende räumliche Brechungsindeksmodulation erzeugt (Bild 2). Diese periodische Modulation stellt ein optisches Phasengitter dar. Die Gitterebenen breiten sich in der beschriebenen Reflexionskonfiguration senkrecht zur Achse der Schreibstrahlen aus. Wird das Speichermedium während der Belichtung des Mediums senkrecht zur Strahlachse bewegt, so entstehen räumlich begrenzte Gitterebenen (Bild 3) als streifenförmige holographische Strukturen bezüglich der x-y-Ebene. Die Länge der Streifen kann beliebig variiert werden. Beim Auslesen wird die Reflexionseinheit entfernt. Die Reflexion des Laserstrahls an der dreidimensionalen Gitterstruktur resultiert in einem High-Level-Signal, entsprechend der Pits bei der CD. Die unbelichteten Bereiche dazwischen werden analog zu den Lads der CD als Low-Level-Signal detektiert. Entscheidende Vorteile gegenüber der CD/DVD ergeben sich nun durch Anwendung von Multiplexverfahren.

[0016] Für das zu beschreibende System ist eine Kombination von Wellenlängenmultiplexing und Tiefenmultiplexing vorgesehen. Beim Wellenlängenmultiplexing werden mehrere dreidimensionale Mikrogitter mit Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge simultan in ein und dasselbe Volumenelement geschrieben. Aufgrund der Bragg-Selektivität reflektiert jedes Gitter hauptsächlich das Laserlicht seiner Einschreibwellenlänge. Somit kann mit mehreren Wellenlängen gleichzeitig ausgelesen werden.

[0017] Durch die begrenzte longitudinale Ausdehnung mikroholographischer Gitter wird Tiefenmultiplexing realisierbar. Hierbei findet die Fokussierung in unterschiedlichen Tiefen des Mediums statt (Bild 4). Die Daten sind in mehrere

unabhängigen untereinander liegenden Ebenen gespeichert, die mit stark fokussierten Laserstrahlen separat adressiert werden. Die Datenebenen sind jeweils durch eine wenige Mikrometer dünne Schicht des unbeschriebenen Materials voneinander getrennt, um die Überlappung der Gitter aus benachbarten Ebenen zu vermeiden.

[0018] Zum Erfolg eines Speicherkonzepts tragen Modulations- und Codierungsverfahren wesentlich bei. Der Fluss des Datenstroms bei dem zu beschreibenden mikroholographischen System basiert prinzipiell auf existierenden Standardspeicherverfahren (Bild 5). Nachdem die zu speichern Daten eine Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung durchlaufen haben, werden sie entlang einer spiralförmigen Spur holographisch, entsprechend der beschriebenen Multiplexverfahren, abgelegt. Zur Rekonstruktion der Originaldaten beim Auslesen erfolgt sukzessiv die Decodierung des Aufnahme- und Fehlerkorrektur-Codes.

[0019] Bei der Fehlerkorrektur sind einerseits eine große Menge an Einzelsehler, verursacht durch Fehler in elektrischen Schaltkreisen, andererseits große Flächenfehler, die z. B. durch Verunreinigungen zustande kommen, zu berücksichtigen. Dieser Fehlerstruktur sind sowohl CIRC (Cross Interleaving Reed Solomon Codes) als auch Reed Solomon Product Code optimal angepasst.

[0020] Hinsichtlich der Aufnahmecodierung ergeben sich für das mikroholographische System die gleichen Anforderungen und Ziele: Maximierung der Speicherdichte und Datensicherheit. Deshalb sind wenige Übergänge (Änderungen in der Reflektivität) sowie ein möglichst gleichmäßiges Speichermuster mit definierten Abständen zwischen den Hologrammen erstrebenswert. Die hoch entwickelten und gut etablierten Verfahren, wie z. B. EFM (Eight to Fourteen Modulation) und dessen Ergänzung durch Koppelbits, bzw. EFMPlus, bilden wahlweise einen Bestandteil des mikroholographischen Systems und führen so zur Optimierung der Speicherleistung bezüglich oben genannter Kriterien.

[0021] Die Einbindung der Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung in das mikroholographische Multiplexkonzept ist beispielhaft in Bild 6, basierend auf der Codierung zur Fehlerkorrektur und zur Modulation, dargestellt. Um den Vorteil des parallelen Schreibens und Lesens durch verschiedene Multiplexverfahren optimal nutzen zu können, findet die Codierung parallel in mehreren Multiplexkanälen statt. Dazu werden die Originaldaten in zweckmäßige Blöcke, abhängig vom verwendeten Codierungsverfahren, aufgeteilt und abwechselnd den einzelnen Kanälen, entsprechend der Multiplexverfahren, zugewiesen. Dort erfolgt die Fehlerkorrekturcodierung und nach weiteren Schritten der Aufnahmecodierung die parallele Speicherung als Multiplex im Photopolymer.

[0022] Im Gegensatz zu vorausgehenden dreidimensionalen Speicherkonzepten verschlüsselt das erfundene System die Eins als Signalkante und nicht als einzelnes Hologramm. Der Abstand zweier Kanten bestimmt die Anzahl der Nullen dazwischen. Diese Art der physikalischen Codierung wird erst durch die Erzeugung von streifenförmigen holographischen Gittern beliebiger Länge möglich. Dass sie sich in Verbindung mit oben genannten Modulationen wesentlich auf die Speicherdichte auswirkt, demonstriert Bild 7. Beim Auslesen in Bild 7a, entsprechend der bisherigen einfachen physikalischen Codierung, erhält man durch Auflösen eines einzelnen Hologramms ein Bit Information. Dabei bestimmt die Größe eines Hologramms die maximal aufzulösende Frequenz. In Verbindung mit EFM, bzw. EFM-Plus, welche beide dafür sorgen, dass die Bitstruktur homogen wird und zwei Einsen durch möglichst viele Nullen getrennt werden, kann diese Frequenz durch die hier zugrunde gelegte physikalische Codierung deutlich herabgesetzt werden (Bild 7b).

Während die Bitsequenz zur Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung noch als NRZ-Signal (Non Return To Zero) vorliegt, wird es vor der physikalischen Speicherung in ein NRZI-Signal (Non Return To Zero Inverted) umgewandelt. Hier kehrt sich das Signal in der Mitte jeder Eins um, so dass eine Eins als Kante im Signalpegel erscheint. Als Vorteile ergeben sich weniger Übergänge, größere Strukturen bei gleicher Datenmenge und damit eine größere Datendichte, da die flächenhafte Ausdehnung der Gitter beugungsbeschränkt ist.

[0023] Neben der Optimierung der Speicherleistung ermöglicht das beschriebene Codierungsverfahren die Abwärtskompatibilität des mikroholographischen Speichersystems zu konventionellen CD/DVD Systemen.

[0024] Die Erfindung wird nachfolgend anhand einiger Ausführungsbeispiele näher erläutert. Es zeigen:

#### Zeichnungsbeschreibung

[0025] Bild 1 Konzeption des mikroholographischen Datenspeichersystems mit dreidimensionalen Streifengittern

[0026] Bild 2 Schreiben und Lesen von lokalisierten mikroskopischen Reflexionsgittern

[0027] Bild 3 Mikrogitter angeordnet in Spuren und mit variabler Gitterlänge entlang einer Spur.

[0028] Bild 4 Tiefenmultiplexing: Mikrogitter gespeichert in mehreren Datenebenen innerhalb der Speicherschicht.

[0029] Bild 5 Schematische Darstellung des mikroholographischen Speicherverfahrens.

[0030] Bild 6 Einbindung der Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung in das mikroholographische Multiplexkonzept.

[0031] Bild 7a Einfache physikalische Codierung durch Mikrohologramme.

[0032] Bild 7b Physikalische Codierung durch streifenförmige Mikrogitter variabler Länge.

[0033] Bild 8a Streifenförmige Mikrogitter angeordnet in Spuren auf der rotierenden Speicherdisk.

[0034] Bild 8b Konzeption des Laufwerks: der Schreib-/Lesekopf mit den Lasern und der Schreibkopf mit der Reflexionseinheit bewegen sich synchron und gekoppelt während des Schreibens.

[0035] Bild 9 Prinzipielle Skizze eines Vierquadrantendetektors.

[0036] Bild 10 Konfiguration des Speichermediums.

[0037] Bild 11 System: Erste Konzeption zur Ausführung des mikroholographischen Datenspeichersystems mit dem Pilotlaser.

[0038] Bild 12 Objektiv im System 1 als Linsendoublet mit dem Korrekturdeckglas.

[0039] Bild 13 Tracking mit dem Pilotstrahl: Der rote Pilotstrahl und der blaue Schreibstrahl relativ zueinander.

[0040] Bild 14 Chromatische Aberration: Tiefenversetzung der mit unterschiedlichen Wellenlängen aufgenommenen Mikrogitter.

[0041] Bild 15 Tiefenmultiplexing: Hauptdatenebene mit den leicht zueinander versetzten Elementarebenen.

[0042] Bild 16 System 2: Zweite Konzeption zur Ausführung des mikroholographischen Datenspeichersystems.

[0043] Bild 17 Objektiv im System 2 als ein abstimmbares Linsentriplet zur Korrektur der chromatischen Aberration.

[0044] Bild 18 Tracking mit dem Schreiblaserstrahl mit Hilfe der vorformatierten Spurenstruktur.

#### Ausführungsbeispiel

[0045] Ein Ausführungsbeispiel für ein optisches Daten-

speichersystem mit dreidimensionalen Streifengittern ist im Bild 1 konzeptionell dargestellt. Das System enthält im wesentlichen Laserquellen, die die Schreib- und Lesestrahlen generieren, ein diskförmiges Speichermedium, einen Motor der die Speicherdisk rotieren lässt, eine reflektierende Einheit auf der gegenüberliegenden Seite des Speichermediums, verschiedene optische Elementen zum Einkoppeln, Fokussieren und Auskoppeln einzelner Laserstrahlen, ein Detektorenarray, und ein Servosystem zur Strahlführung und Fokuskontrolle.

[0046] Als Laserquelle dient ein Diodenlaserbarren, der Licht mit mehreren unterschiedlichen Wellenlängen im blau-violetten Spektralbereich zwischen 400 nm und 430 nm emittiert. Das Lasersystem implementiert longitudinale Modenstabilisierung. Die Emission der Diodenlaser ist modenstabilisiert, so dass sich emittierte Strahlen durch eine große Kohärenzlänge auszeichnen. Die einzelnen Wellenlängen können separat voneinander angestellt werden, so dass die Leistung einzelner Schreibstrahlen unabhängig voneinander und dem Datenstrom entsprechend moduliert werden kann. Die zu speichernde Datensequenz wird zunächst entsprechend Bild 6 aufgeteilt und codiert. Der resultierende Aufnahmecode eines jeden Kanals durchläuft anschließend die NRZI-Konversion. Das NRZI-Signal wird zur Modulation der Laser verwendet.

[0047] Die Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge werden nach Austritt aus dem Diodenbarren einzeln kollimiert und mit einer Multiplexeinheit zusammengeführt. Zur Strahlkollimierung ist hinter der Multiplexeinheit ein Strahlkollimator (K) angeordnet. Der kollimierte Laserstrahl wird mit einem Linsensystem (L) hoher numerischer Apertur ( $NA > 0.6$ ) fokussiert. Das Linsensystem ist hinter einem Strahlteiler (ST) angeordnet, welcher zur Auskopplung der beim Auslesen reflektierten Strahlen dient. Diese werden zur Datendetektion sowie zur Positionierung des Schreib-/Lesekopfes benötigt.

[0048] Die in Bild 1 dargestellten konventionellen Strahlteiler können durch eine geeignete Kombination von Polarisationsstrahleiter und  $\lambda/4$ -Plättchen ersetzt werden, um Verluste zu reduzieren.

[0049] Das Speichermedium ist vorzugsweise eine optische Disk, welche aus einem vorformatierten optischen Substrat, einer photoempfindlichen Schicht (vorzugsweise Photopolymermaterial) mit der Dicke von einigen hundert Mikrometer bis 1 mm und einer Schutzschicht, besteht. Die Speicherdisk rotiert durch einen vibrationsfreien Motor mit mehreren Tausend Umdrehungen pro Minute rotiert. Die Diskkonfiguration eignet sich am besten als Form des Speichermediums in dem hier dargestellten optischen Speichersystem. Das Speichermedium kann ebenfalls in einer rechteckigen Konfiguration realisiert werden, als eine Speicherplatte oder im Kartenformat. Die Rotation der Disk wird in diesem Fall durch lineare Bewegungen der Speicherplatte in x-y-Richtung einer Ebene ersetzt. Ein 3-Achsen lineares Positioniersystem übernimmt gleichzeitig die vertikale Positionierung beim Schreiben und Lesen von Informationen in verschiedenen Tiefen des Speichermediums.

[0050] Zum Einschreiben der Daten wird der durch den Strahlteiler hindurchtretende Strahl mittels eines Linsensystems (L) auf die photoempfindliche Speicherschicht fokussiert. Der durch die Disk tretende Strahl trifft auf eine reflektierende Einheit (RE), die den Strahl in sich zurückreflektiert. Im einfachsten Fall wird diese Einheit als Hohlspiegel realisiert. Die beiden Strahlen interferieren im Überlappbereich, so dass in der Strahltrille ein periodisches Intensitätsmuster entsteht, welches eine entsprechende räumliche Modulation des komplexen Brechungsindeks des Speichermediums induziert. Diese auf einen Mikrometerbereich lokalisiert

sierte Modulation kann sowohl eine periodische Variation des reellen Brechungsindexes als auch der Absorption des Speichermaterials sein. Dementsprechend werden mikrolokalisierte dreidimensionale Phasen- oder Amplitudengitter erzeugt, oder aber gemischte Gitter, in welchen gleichzeitig der Brechungsindex und die Absorption eine lichtinduzierte, periodische Modulation aufweisen.

[0051] Vorzugsweise werden die Mikrogitter als pure Phasengitter in Photopolymeren erzeugt, indem eine dreidimensionale Modulation des reellen Brechungsindex induziert wird. Diese durch die starke Fokussierung des einschreibenden Strahls lokalisierte Modulation stellt ein mikroskopisches Reflexionsgitter dar. Da die Mikrogitter von den beugungsbegrenzten Laserstrahlen mit einer Wellenlänge im blau-violetten Spektralbereich eingeschrieben werden, ist, die räumliche Ausdehnung des Gitters auf einen Submikrometerbereich begrenzt. Die transversale Ausdehnung der Gitter (Abmessungen in der 2D Ebene einer Datenschicht) kann annähernd als Spotgröße des fokussierten Laserstrahls in der Strahltaile berechnet werden. Die Tiefenausdehnung der Gitter wird annähernd als doppelte Rayleigh-Länge des Laserstrahls ermittelt. Die Lichtintensität eines beugungsbegrenzten Laserstrahls ist im sogenannten fokalen Bereich konzentriert, welche durch die Rayleigh-Länge  $z_R$  beschrieben wird. Darüber hinaus, fällt die Intensität sehr schnell ab, so dass der Brechungsindex nur im fokalen Bereich effizient moduliert wird. Beispielsweise ergibt sich für die Wellenlänge von 415 nm gemäß:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

ein fokaler Bereich von etwa  $2z_R$  600 nm unter der Annahme, dass der Strahl beugungsbegrenzt fokussiert ist, mit einem Gaußradius von 200 nm in der Strahltaile.

[0052] Die Mikrogitter werden auf einer rotierenden Speicherplatte dynamisch induziert (Bild 8a). Beim Einschreiben entstehen während der Belichtung Schichten mit gleichem Brechungsindex. Die Gittererzeugung findet hauptsächlich im konfokalen Bereich des fokussierten Laserstrahls statt, so dass das resultierende Gitter aus annähernd ebenen Flächen besteht. Wird das Speichermedium bei der Belichtung senkrecht zur Strahlachse bewegt, so breiten sich die Gitterebenen in Bewegungsrichtung aus. Es entstehen lange geogene mikroholographische Volumengitter. Die Gitterlänge in Spurrichtung sowie die Abstände einzelner Gitter entsprechen dem Dateninhalt des NRZI-Signals.

[0053] Ein geringer Prozentsatz des auf den Hohlspiegel fallenden Strahls wird ausgekoppelt und mit Hilfe eines astigmatischen Linsendoublets, das aus einer kurzbrennweiten plankonvexen sphärischen Linse und einer langbrennweiten plankonvexen Zylinderlinse zusammengesetzt ist, auf einen Vierquadrantendetektor abgebildet. Aus diesen Signalen werden in einer elektronischen Steuereinheit das Focus Error Signal (FES) sowie das Tracking Error Signal (TES) generiert, die zur Ansteuerung der Spulenpaare (Aktuatoren) benötigt werden. Durch die astigmatische Fokussierung des Linsendoublets entsteht nicht nur ein einzelner Brennfleck, sondern zwei Brennebenen in  $f_1$  und  $f_2$  (Bild 9). Da die Längsachsen der beiden Foki zueinander senkrecht stehen, ist es mit dem Vierquadrantendetektor möglich, Positionen zwischen  $f_1$  und  $f_2$  zu bestimmen. Je nachdem ob das Differenzsignal positiv oder negativ ist, wird der Hohlspiegel mittels Aktuatoren in die eine oder andere Richtung bewegt. Die elektronische Steuerung übernimmt auch die vertikale Justierung. Dazu werden die Signale der einzelnen Detektorsegmente miteinander verglichen, um die Position des Spots relativ zum Mittelpunkt des Vierquadrantendetek-

tors zu ermitteln (Bild 9). Die elektronische Steuereinheit errechnet Signalkombinationen des Vierquadrantendetektors, welche weiter zur Steuerung von Aktuatoren verwendet werden. Mit den resultierenden Signalen werden sowohl die Linsen- als auch Hohlspiegel-Aktuatoren so angesteuert, dass ihre Position zu einem adressierten Volumenelement des Speichermediums und relativ zueinander vollständig dynamisch geregelt wird.

[0054] Das Auslesen erfolgt ohne die reflektierende Einheit in Bild 1. Der Lesestrahl wird an den induzierten Gitter so gebeugt, dass das Originalsignal exakt rekonstruiert wird. Der rekonstruierte Signalstrahl breitet sich gegenläufig zum einfallenden Lesestrahl aus. Die Rekonstruktion der in Form mikroholographischer Gitter gespeicherten Daten wird durch die Beugungseffizienz charakterisiert. Die Beugungseffizienz eingeschriebener Mikrogitter wird als Verhältnis der Leistung des an dem Gitter reflektierten Strahls zur Leistung des einfallenden Lesestrahls definiert. Bei der Rekonstruktion der von stark fokussierten gegenläufigen Strahlen erzeugten Reflexionsgitter wird die Beugungseffizienz durch

$$\eta = \frac{4}{w_0^2} \int_0^{\infty} \tanh^2 \left[ \frac{\pi \Delta n d}{\lambda} \exp \left( -\frac{2r^2}{w_0^2} \right) \right] \exp \left( -\frac{2r^2}{w_0^2} \right) r dr$$

25

gegeben und kann auch bei sehr kleinen Spots des Laserstrahlfokus hohe Werte erreichen. Zum Beispiel, schon für einen Laserspot von nur 400 nm Durchmesser, eine Photopolymerschicht mit 500 µm Dicke und einer maximalen Brechungsindexmodulation von  $\Delta n = 0.05$  kann die Beugungseffizienz je nach der effektiven Tiefe des Gitters die Werte deutlich über 10% erreichen. Insbesondere mit neuen Photopolymermaterialien, die sich sowohl durch hohe Honomogenität und geringe Streuung im Material als auch durch sehr hohe Werte der maximalen Brechungsindexmodulation auszeichnen, wird es möglich Mikrogitter hoher Beugungseffizienz und Qualität aufzunehmen. Die Vorteile die sich daraus ergeben, werden sowohl durch ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis als auch durch sehr hohe erreichbare Multiplexraten deutlich.

[0055] Die Gitterrekonstruktion erfolgt unter Bragg-Bedingung, d. h. ein Laserstrahl bestimmter Wellenlänge detektiert nur die Anteile des Multiplexgitters, die mit derselben Wellenlänge erzeugt sind. Durch die Bragg-Selektivität mikroholographischer Gitter wird es möglich, die in ein und denselben Volumenelement eingeschriebenen Daten separat zu detektieren und in parallelen Kanälen zu dekodieren. Der von der Platte zurückreflektierte und ausgekoppelte Strahl wird mittels eines weiteren Strahleiters aufgespalten. Ein Teilstrahl fällt auf ein weiteres astigmatisches Linsendoublet, das den Strahl auf einen zweiten Vierquadrantendetektor fokussiert. In der elektronischen Steuereinheit werden die FE (Focus Error) sowie TE (Tracking Error) Signale errechnet, die die Aktuatoren zur Linsenjustierung ansteuern.

[0056] Der durch den Strahleiter hindurchtretende Strahl wird in einer Demultiplexeinheit in die einzelnen Spektralkomponenten aufgespalten. Die mit den einzelnen Wellenlängen eingeschriebenen Daten werden jeweils mit einem Detektor ausgelesen. Die Detektoren sind in einem Array angeordnet. Die Daten aus allen Wellenlängenkanälen werden parallel ausgelesen und nach der Decodierung als elektronische Signale zur Weiterverarbeitung bereitgestellt. Um Signalüberlappung beim Tiefenmultiplexing zu vermeiden, werden die optischen Detektoren in einer konfokalen Anordnung realisiert, die die sogenannte Tiefenselektion ermöglicht. Mit optischen Raumfiltern wird jeweils nur eine Schicht der gespeicherten Daten adressiert, da in konfokaler

Anordnung nur die in einer bestimmten Tiefe reflektierten Strahlen (der Fokusposition des Lesestrahls entsprechend) durchgelassen und alle unerwünschten Anteile abgeblendet werden.

[0057] Die optischen und elektro-optischen Komponenten, dargestellt in **Bild 1**, sind in zwei Schreib-/Leseköpfen integriert (**Bild 8b**), die mit einem beweglichen Arm positioniert werden. Die Laserquellen und die Fokussieroptik befinden sich in dem einen Schreib-/Lesekopf, die Reflexionseinheit in dem anderen, der beim Auslesen deaktiviert wird. Beim Schreiben der Daten sind die beiden Köpfe miteinander gekoppelt, so dass sie synchron von unterschiedlichen Seiten einzelne Spuren auf der Disk adressieren.

[0058] Die Bewegung der Schreib-/Leseköpfe in vertikaler Richtung wird mit einem abstimmbarer Fokussiersystem kontrolliert. Bei einer großen Anzahl der Ebenen, die in unterschiedlichen Tiefen der Speicherschicht zur Datenspeicherung genutzt werden, wird es notwendig, den Laserfokus in einer bestimmter Tiefe "festzuhalten". Dies kann mit einer vorformatierten Substratstruktur gewährleistet werden, die gleichzeitig auch zur Kontrolle der Fokusposition unter dem Einsatz des oben beschriebenen Servosystems als Referenz genutzt wird (**Bild 10**). Die Substratstruktur wird vorformatiert, indem eine leere spiralförmige Spur dem optischen Substrat eingeprägt wird. Solche Spuren, sogenannte Tracks, ermöglichen eine durch optoelektrische Servosysteme kontrollierte Strahlpositionierung und -führung. Die Position des Laserstrahlfokus muss sowohl in einer zweidimensionalen Ebene der Speicherdisk als auch in der Tiefe kontrolliert und bei der rotierenden Disk durch die Regelung nachjustiert werden. Beim Schreiben gilt das sowohl für den einfallenden als auch für den reflektierten Strahl, deren exakter Überlapp eine entscheidende Rolle für die Gittererzeugung hat. Beim Lesen eingeschriebener Daten ist die reflektierende Einheit deaktiviert, so dass nur der einfallende Strahl präsent ist.

[0059] Die Information wird in einer Datenebene innerhalb der Speicherschicht in spiralförmigen Spuren als streifenförmige Mikrogitter geschrieben. Mehrere solche Ebene werden in definierten Abständen von einigen 10 µm vertikal durch die Tiefe des Speichermediums angeordnet. Folgende Aufgaben sind zu lösen, um sicherzustellen, dass sich der Laserstrahlfokus immer entlang der kodierten Datenspur bewegt:

- i) Der Laserstrahlfokus muss auf der rotierenden Disk immer der Spur folgen, d. h. kleine Abweichungen sollen mit Aktuatoren durch transversale Bewegungen der Objektivlinse und/oder der reflektierenden Einheit korrigiert werden. Die Aktuatoren werden vom Servosystem durch das TES-Signal angesteuert.
- ii) Der Strahlfokus muss in der Tiefe des Mediums exakt in einer Datenebene positioniert und festgehalten werden. Die Justierung erfolgt durch vertikale Bewegungen der Objektivlinse und/oder der reflektierenden Einheit. In diesem Fall werden die Aktuatoren durch das FES-Signal angesteuert.
- iii) Beim Tiefenmultiplexing ergibt sich noch die weitere Aufgabe, den Strahlfokus kontrolliert und definiert von einer auf die nächste Ebene zu verschieben.

[0060] Aus der Aufgabe, die automatische Fokussierung und Positionierung sowie Regelung der Fokustiefe zu realisieren, ergeben sich zwei verschiedene Lösungswege, bzw. Systemkonzeptionen, welche in folgendem detailliert beschrieben werden.

## System 1

[0061] In dem in **Bild 11** dargestellten System wird zusätzlich zu den Laserquellen, die die Schreib-/Lesestrahlen emittieren, ein Pilotlaser **70** verwendet, der elektronische Signale zur Regelung der transversalen Fokusposition in der Spur sowie der Fokustiefe liefert. Die Daten werden mit mehreren modenstabilisierten Diodenlasern **60** geschrieben, beispielsweise mit Emissionswellenlängen im blauen Spektralbereich zwischen 400 nm und 430 nm. Das Speichermaterial **102** in **Bild 13**, beispielsweise ein Photopolymermaterial, ist in diesem Spektralbereich photoempfindlich und kann durch Belichtung mit dem Interferenzmuster einschreibender Strahlen so verändert werden, dass ein Mikrogitter erzeugt wird. Es wird vorausgesetzt, dass die Emissionswellenlänge des Pilotlasers **70** außerhalb des Sensitivitätsbereichs des Speichermaterials liegt, so dass dieser zur Positionierung und Führung des blauen Schreibstrahls, d. h. zur automatischen Fokussierung und Positionierung des Objektivs **10** und der reflektierenden Einheit **30** verwendet werden kann.

[0062] Als Pilotlaser **70** in **Bild 11** wird beispielsweise ein Diodenlaser mit einer Emissionswellenlänge im roten Spektralbereich verwendet. Die Sensitivität des photoempfindlichen Speichermaterials ist für den blauen Bereich optimal und reicht nicht bis ins Rote, d. h. das Material ist einer Belichtung mit rotem Licht gegenüber unempfindlich. Der rote Diodenlaser wird ausschließlich zur Steuerung des Servosystems sowie zur Führung des blauen Schreib-/Lesestrahs verwendet.

[0063] Die blauen modenstabilisierten Diodenlaser **60** im System **Bild 11** werden einzeln kollimiert und mit einer Multiplexeinheit **61** zusammengeführt. Die Laser emittieren unterschiedliche Wellenlängen im blauen Bereich und können wie vorher beschrieben einzeln gesteuert werden. Die zu speichernden digitalen Daten werden vorausgehend in parallelen Kanälen zur Fehlerkorrektur und Aufnahmemodulation codiert und als elektronische Signale an die Diodentreiber übertragen.

[0064] Das Speichermedium in **Bild 13** ist eine optische Disk **100**, die aus einem Substrat **103**, einer Photopolymer-Schicht **102** und einer Schutzschicht **101** besteht. Das Substrat **103**, beispielsweise Polycarbonat, wird mit spiralförmigen Spuren vorformatiert. Die Spurbreite sowie Abstände zwischen benachbarten Spuren sind entscheidend für die im Photopolymer zu speichernde Datenstruktur und beeinflussen daher direkt die resultierende Speicherdicthe. Die Spurenstruktur wird so minimiert, dass beugungsbegrenzt fokussierte Strahlen der verwendeten Laser sie noch detektieren können. Eine homogene Speicherschicht **102** aus photoempfindlichem Polymermaterial mit der Dicke von etwa 0,5 bis 1 mm wird auf das Substrat aufgetragen. Die Speicherschicht wird mit einer Schutzschicht **101** vor äußeren Einflüssen geschützt.

[0065] Der mit einer zusätzlichen Linse **53** kollimierte Multiwellenlängenstrahl wird mit einem Objektiv **10** hoher numerischer Apertur ( $NA > 0.6$ ) in die photoempfindliche Schicht fokussiert.

[0066] Der rote Strahl des Pilotlasers **70** wird mit Linse **71** kollimiert, mit dem Strahleiter **72** in den Strahlengang des blauen Multiwellenlängenstrahls eingekoppelt und anschließend mit demselben Linsensystem **10** in die photoempfindliche Schicht fokussiert.

[0067] Das Objektiv **10**, beispielsweise in **Bild 12** dargestellt, ist ein Linsensystem, welches aus einem Linsendoublet **11** und **12**, mit einer Fokussierlinse **12** hoher numerischer Apertur und einem Korrekturglasplättchen **13** besteht. Das Linsensystem ist auf einem Spulenpaar, dem sogenann-

ten Aktuator 47, angeordnet. Das Linsendoublet 11/12 ist für eine mittlere Wellenlänge im blauen Bereich so optimiert, dass der Strahl entsprechender Wellenlänge beugungsbegrenzt auf einen minimalen Spot fokussiert wird. Das Korrekturplättchen 13 übernimmt die Anpassung des Strahlengangs bei unterschiedlichen Dicken der Speicherschicht 102 mit dem Ziel, den beugungsbegrenzten minimalen Spot des blauen Strahls unabhängig von der Tiefe zu erhalten. Beim Tiefenmultiplexing bewegt sich der Strahlfokus von einer Datenebene zur anderen, so dass sich der optische Weg durch das Speichermaterial ändert. Sphärische Aberration führt dann zu Verformung und Vergrößerung des Laserspots im Fokus. Wird der Abstand zwischen dem Linsendoublet 11/12 und dem Korrekturglas 13 mit einem ringförmigen Piezoaktuator 14 definiert verändert, so kann das Linsensystem 10 für jede beliebige Tiefe des Strahlfokus in einem Bereich von etwa 1 mm optimal eingestellt werden.

[0068] Der rote Laserstrahl wird so fokussiert, dass der Fokus in der vorformatierten Substratstruktur liegt. Die exakte Positionierung erfolgt wie vorher beschrieben mit einem Servosystem, d. h. in einem Regelungskreis, indem ein Teil des an der Substratstruktur 103 zurückreflektierten Strahls mit dem Strahlteiler 51 ausgetauscht und mit Hilfe des astigmatischen Linsendoublets 44 auf einen Vierquadrantendetektor 45 abgebildet wird. Die elektronische Steuereinheit errechnet aus den Signalen von vier Detektorsegmenten das Focus Error Signal und das Tracking Error Signal. Mit diesen Signalen wird das Spulenpaar des Aktuators 47 so angesteuert, dass das Linsensystem 10 den roten Laserspot exakt auf eine Spur der Substratstruktur 103 positioniert. Dies impliziert sowohl die transversale als auch die vertikale Justierung des fokussierenden Objektivs. Die Position des roten Laserspots wird dann dynamisch geregelt, indem jede kleine Abweichung von der Spur entsprechende Differenzsignale auf dem Vierquadrantendetektor 45 generiert, welche von der elektronischen Einheit 46 in Bewegungen des Aktuators 47 umgesetzt werden. Das Objektiv 10 wird dynamisch in Echtzeit nachjustiert, um sicherzustellen, dass sich der Fokus des roten Pilotlasers exakt entlang und in der Spur bewegt.

[0069] Nach dem Durchgang durch das Linsensystem 10 liegen die Spots, d. h. die Strahltaillen, des roten und blauen Laserstrahls vertikal auseinander wie in Bild 13 dargestellt. Da das Linsendoublet 11/12 für die Wellenlänge des blauen Lasers, z. B. 420 nm, optimiert ist, wird der rote Laserfokus (z. B. bei 635 nm) in einem bestimmten Abstand zum blauen Fokus entlang der optischen Achse abgebildet. Der Abstand zwischen den beiden Foki kann sehr präzise und definiert mit der Kollimatorlinse 71 variiert werden. Durch Bewegungen des Kollimators 71 ändert sich die Divergenz des roten Laserstrahls und damit auch der Abstand zwischen dem roten und blauen Fokus in der Speicherschicht.

[0070] Dies stellt die Basis für die optoelektromechanische Regelung in der ersten Systemkonzeption dar: Der rote Strahl wird durch das Servosystem fest an den vorformatierten Spuren im Substrat 103 gehalten. Er übernimmt das sogenannte Tracking, d. h. die Strahlführung und Positionierung des blauen Strahlfokus entlang der Spur und in der Tiefe, und liefert gleichzeitig elektronische Regelungssignale für den Aktuator 47. Der blaue Multiwellenlängenstrahl, der zum Schreiben und Lesen von Informationen verwendet wird, folgt dem Roten entlang der Spur und in einem durch die Divergenz definierten Abstand in der Tiefe. Die Positionierung des blauen Fokus auf eine bestimmte Datenebene, in der mehrere diskrete Datenebenen enthaltenden Konfiguration des Speichermediums (Bild 4), erfolgt ebenfalls durch Änderung der Divergenz des roten Strahls. Diese hat eine Verschiebung des blauen und roten Fokus relativ

zueinander zufolge. Da der rote Fokus durch das Servosystem fest auf der Substratstruktur 103 gehalten wird, verschiebt sich der blaue Fokus vertikal durch die Tiefe der Speicherschicht 102. Diese Verschiebung wird durch piezogesteuerte Bewegungen der Linse 71 kontrolliert.

[0071] Die Laserstrahlen werden nach dem Durchgang durch die Speicherplatte von einer reflektierenden Einheit in sich zurückreflektiert. Ein für den blauen Spektralbereich optimierter Hohlspiegel 30 bildet die fokussierten Schreibstrahlen der blauen Laser exakt in sich zurück ab. Für jede verwendete Wellenlänge interferieren der einfallende und reflektierte Strahl, die sich entlang der Strahlachse überlappend in entgegengesetzten Richtungen ausbreiten, so dass ein periodisches Intensitätsmuster entsteht. Dieses Muster bewirkt eine entsprechende Modulation des Brechungsindeks, welche ein lokalisierteres Mikrogitter darstellt. Die Information ist in der Periodizität des Mikrogitters, d. h. dem Abstand der Gitterebenen, gespeichert. Mit dem beschriebenen Verfahren werden lokalisierte Reflexionsgitter erzeugt, welche beim Auslesen als lokale Variation in der Reflektivität der Disk detektiert werden. Die Gitterebenen breiten sich senkrecht zur Rotationsachse der Disk aus. Es ist daher möglich, streifenförmige Mikrogitter auf einer rotierenden Disk dynamisch, mit unterschiedlichen dem codierten Dateninhalt entsprechenden Längen aufzunehmen.

[0072] Eine exakte Überlagerung des einfallenden und reflektierten Strahls spielt bei der Gittererzeugung eine entscheidende Rolle. Der Fokus des reflektierten Laserstrahls wird wie beschrieben von einem anderen Regelungskreis exakt positioniert und nachjustiert. Ein Prozent des auf den Hohlspiegel 30 fallenden Strahls wird durchgelassen und von dem astigmatischen Linsendoublet 40 auf einen zweiten Vierquadrantendetektor 41 projiziert. Mit den von der elektronischen Steuereinheit generierten FE und TE Signalen werden die Spulen des Aktuators 43 zur Spiegeljustierung angesteuert.

[0073] Die in einen Multiwellenlängenstrahl zusammengeführten blauen Laserstrahlen erfahren nach dem Durchgang durch das Linsensystem 10 unterschiedliche optische Wege durch chromatische Aberration. Das Linsendoublet 11/12 ist für eine mittlere Wellenlänge des verfügbaren blauen Spektralbereichs optimiert. Die Strahlen unterschiedlicher Wellenlängen werden so fokussiert, dass ihre Strahltaillen entlang der optischen Achse in Abständen von etwa 100 nm auseinander liegen. Durch chromatische Aberration wird es möglich mehrere Mikrogitter mit Strahlen unterschiedlicher Wellenlängen räumlich in der Tiefe leicht zueinander versetzt, gleichzeitig zu schreiben und zu lesen. Wie in Bild 14 dargestellt, werden diese Gitter in diskreten, dicht untereinander liegenden Elementarschichten 104 des Speichermediums erzeugt.

[0074] Die Vorteile dieser Methode ergeben sich vor allem daraus, dass die mit unterschiedlichen Wellenlängen erzeugten Mikrogitter räumlich zueinander versetzt sind, d. h. sich nicht vollständig überlagern. Beim Schreiben von multiplen holographischen Gittern in ein und demselben Volumen wird die maximal erreichbare Brechungsindeksmodulation des Speichermaterials zwischen allen Gittern geteilt. Die einzelnen Gitter erfahren daher eine schwächere Modulation und haben eine dementsprechend niedrigere Beugungseffizienz. Kombiniert mit den "cross-talk"-Effekten, die beim parallelen Lesen mehrerer Gitter auftreten können, führt die verminderte Beugungseffizienz zu Fehlern beim Rekonstruieren gespeicherter Daten. Um dies zu vermeiden muss die Multiplexrate gesenkt werden.

[0075] Das oben beschriebene Konzept bietet daher alle Vorteile des Wellenlängenmultiplexing und beeinflusst die Implementierung des Tiefenmultiplexing in keinerlei Weise.

Es entsteht eine komplexe, in **Bild 15** skizzierte Datenstruktur, mit den untereinander, in Abständen von etwa 10 µm oder größer, liegenden Hauptdatenebenen **105**, welche wiederum aus mehreren, einzelnen Wellenlängen der blauen Schreibstrahlen entsprechenden, Elementardatenebenen **104** bestehen. Mit Abständen von etwa 100 nm sind diese Elementarebenen **104** einerseits klar voneinander zu trennen und andererseits dicht genug, um eine klar definierte Hauptdatenebene **105** zu bilden. Da sich die mit den unterschiedlichen Wellenlängen eingeschriebenen Mikrogitter räumlich nur am Rande des jeweiligen Modulationsbereichs überlappen, werden die "cross-talk"-Effekte weitgehend vermieden. Die Photoempfindlichkeit sowie das Modulationspotential des Speichermaterials werden optimal ausgenutzt, indem die Beugungseffizienz einzelner Mikrogitter maximiert wird. Die erreichbaren Multiplexraten werden nur durch die Zahl der zur Verfügung stehenden Wellenlängen, bzw. Laser limitiert und nicht durch Material einschränkungen. Für die komplexe mehrschichtige Datenstruktur wird das ganze Volumen des Speichermediums optimal ausgenutzt. Das Schreiben und Lesen mit allen Wellenlängen simultan erhöht Datentransferraten mit demselben Multiplexfaktor.

[0076] Zum Lesen von gespeicherten Informationen wird nur der Lesekopf in **Bild 8b** benötigt. Das Lesen erfolgt mit allen Strahlen, bzw. Wellenlängen simultan. Der rote Pilotlaserstrahl wird zur Regelung der Position des Objektivs **10** und damit zur Führung der blauen Lesestrahlen verwendet. Der Lesestrahl wird an den eingeschriebenen Mikrogittern reflektiert und rekonstruiert damit den informationstragenden Signalstrahl. Die Reflexionsänderungen an den Kanten eingeschriebener steifenförmiger Mikrogitter werden als binäre Einsten detektiert. Die Gitterlänge ergibt die Zahl der Nullstellen zwischen zwei Einsten. Die von Detektoren generierten elektronischen Signale werden zur Decodierung weitergeleitet. Die Decodierung und Weiterverarbeitung erfolgt in einem ähnlich wie in **Bild 6** konzipierten Schema. Das Auslesen der mit den einzelnen Wellenlängen eingeschriebenen Informationen erfolgt mit einem Detektorenarray in parallelen Kanälen.

## System 2

[0077] Eine alternative Systemkonzeption wird in **Bild 16** präsentiert. Das grundlegende Systemdesign bleibt unverändert. Im Unterschied zur vorherigen Konzeption, werden in dieser die blauen Laserstrahlen gleichzeitig zum Schreiben/ Lesen von Mikrogittern und zur automatischen Fokussierung und Strahlführung verwendet, so dass ein Pilotlaser nicht weiter benötigt wird.

[0078] Ein weiterer Unterschied ergibt sich aus dem Einsatz eines abstimmbaren quasi-achromatischen Objektivs, das für jede Wellenlänge so angepasst werden kann, dass der Fokus aller Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge in einer und derselben Position in der Speicherschicht **102** liegt. Dies wird mit einem in **Bild 17** dargestellten Linsensystem **20** realisiert, das aus einem auseinandergezogenen Triplet besteht. Der Abstand zwischen den beiden **17**, die Wellenlängen im blau-violetten Bereich optimierten Linsen **21** und **22**, sowie der Abstand zum Korrekturdeckglas **23** können unabhängig voneinander und mit hoher Präzision mit Piezotaktatoren **24** und **25** verändert werden. Damit wird das Objektivsystem für jede Wellenlänge der verwendeten Laser optimiert, um die durch chromatische Aberration verursachten Verschiebungen des Fokus bei unterschiedlichen Wellenlängen zu kompensieren.

[0079] Die Integration eines solchen abstimmbaren Linsensystems impliziert serielles Schreiben und Lesen im Unterschied zur ersten Systemkonzeption, die mit gleichzeiti-

gem Einsatz aller Wellenlängen in parallelen Kanälen eine multifache Erhöhung der Datenraten ermöglicht. Indem das Objektiv für jede einzelne Wellenlänge extra angepasst wird, können die Schreibstrahlen nur sequentiell, einer nach dem anderen verwendet werden. Die Vorteile der zweiten Konzeption ergeben sich dadurch, dass alle den einzelnen Wellenlängen entsprechenden Mikrogitter in einer und derselben Tiefe des Speichermediums überlappend erzeugt werden und somit dessen Volumen effizienter ausgenutzt wird.

[0080] Des weiteren wird das Tracking und die automatische Fokussierung in diesem Systemkonzept von den blauen Schreibstrahlen übernommen. Das Servosystem bleibt im wesentlichen unverändert und integriert zwei Regelungskreise: Zum einen werden mit dem Astigmat **44**, dem Vierquadrantendetektor **45** und der elektronischen Steuereinheit **46** elektronische Focus Error und Track Error Signale generiert, die über den Aktuator **47** die dynamische vertikale und transversale Justierung des Objektivs **20** gewährleisten. Die vorformatierten Spuren in der Substratstruktur **103** dienen als Referenz beim Generieren von Differenzsignalen mit dem Vierquadrantendetektor **45**. Der blaue Schreibstrahl wird zuerst auf die Spuren im Substrat fokussiert und dann sequentiell in definierten Abständen in die einzelnen Datenebenen innerhalb des Speichermediums positioniert. (Bild 18). Die Tiefenpositionierung des Strahlfokus erfolgt durch piezogesteuerte Anpassung des Korrekturplättchens **23** an die jeweilige Dicke der Speicherschicht. Beim Schreiben der ersten über der Substratstruktur liegenden Datenebene werden die FE- und TE-Signale generiert, indem ein Teil des einfallenden Schreibstrahls von der Spurenstruktur reflektiert und mit dem Strahlteiler **51** und Astigmat **44** auf den Vierquadrantendetektor **45** abgebildet wird. Die Position des Objektivs **20** wird so geregelt, dass der Fokus des Schreibstrahls vertikal in einem bestimmten Abstand und transversal exakt in der Spur festgehalten wird.

[0081] Beim Schreiben und Lesen von Mikrogittern in weiteren Datenebenen wird jeweils die Mikrogitterstruktur in der direkt darunter liegenden Ebene als Referenz genutzt. Die Verschiebung des Strahlfokus durch Abstimmen des 40 Korrekturplättchens entspricht den Abständen zwischen einzelnen Datenebenen bei der Implementierung des Tiefenmultiplexing.

[0082] Die Fokussierung und Führung des von dem Hohlspiegel **30** reflektierten Strahls wird mit dem zweiten Regelungskreis gewährleistet, der die astigmatische Linse **40**, den Vierquadrantendetektor **41**, die elektronische Steuereinheit **42** und den Aktuator **43** integriert. Die Regelung in diesem Kreis erfolgt wie bereits in der ersten Systemkonzeption beschrieben.

## Patentansprüche

1. Datenspeichersystem zum Speichern von Daten in einem Speichermedium, das zwei gegenläufige kohärente Strahlen aufweist und in dem bei kohärenter Überlagerung der Strahlen in mindestens einem Bereich des Speichermediums Gitter einschreibbar sind, dadurch gekennzeichnet, dass das Speichermedium relativ zu den Strahlen verschiebbar ist und die Daten als streifenförmige Gitter in das Speichermedium einschreibbar sind.

2. Datenspeichersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die streifenförmigen Gitter in variabler Länge in das Speichermedium einschreibbar sind.

3. Datenspeichersystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die in Form von streifenförmigen Gittern variabler Länge gespeicherten digitalen Daten so kodiert werden, dass die Kanten am An-

fäng und am Ende der streifenförmigen Gitter jeweils eine binäre Eins darstellen und der Abstand zwischen zwei Kanten die Anzahl binärer Nullen zwischen zwei binären Einsen repräsentiert.

4. Datenspeichersystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass zur physikalischen Codierung der streifenförmigen Gitter eine zu speichernde Bitsequenz in ein NRZI-Signal umgewandelt wird und die Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung verfahren auf Reed Solomon Code und Eight-to-Fourteen-Modulation basieren. 5

5. Datenspeichersystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zwei Strahlen fokussiert werden und sich im Fokus kohärent überlagern, wobei sich die Strahltaille innerhalb des Speichermediums befindet. 15

6. Datenspeichersystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Strahl durch Reflexion des ersten Strahls an einem Spiegel erzeugt wird und sich der einfallende und der reflektierte Strahl mit entgegengesetzten Ausbreitungsrichtungen exakt überlagern. 20

7. Datenspeichersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zum Schreiben der streifenförmigen Gitter ein Laserstrahl verwendet wird, der mit einem Phasenkonjugator direkt in sich selbst abgebildet wird, so dass sich der einfallende und der abgebildete Strahl mit entgegengesetzten Ausbreitungsrichtungen exakt überlagern und sich die Strahltaille innerhalb des Speichermediums befindet. 30

8. Datenspeichersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zum Schreiben der streifenförmigen Gitter ein Laserstrahl verwendet wird, der mit einem Hohlspiegel so reflektiert wird, dass sich der einfallende und der reflektierte Strahl mit entgegengesetzten Ausbreitungsrichtungen exakt überlagern und sich die Strahltaille innerhalb des Speichermediums befindet. 35

9. Datenspeichersystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zum Einschreiben der streifenförmigen Gitter in das Speichermedium kohärente Strahlen mit mindestens zwei Wellenlängen verwendet werden. 40

10. Datenspeichersystem nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlen mit mindestens zwei Wellenlängen durch mindestens zwei modenstabilisierte Diodenlaser erzeugt werden. 45

11. Datenspeichersystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlen der mindestens zwei modenstabilisierten Laser vor dem Einschreiben zusammengeführt werden und dann der Gesamtstrahl kollimiert wird. 50

12. Datenspeichersystem nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere streifenförmige Gitter mit unterschiedlichen Wellenlängen räumlich überlappend in das Speichermedium eingeschrieben werden. 55

13. Datenspeichersystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die streifenförmigen Gitter in mehreren unabhängigen untereinander liegenden Ebenen im Speichermedium eingeschrieben werden, wobei die Laserstrahlen jeweils in die entsprechende Tiefe des Materials fokussiert werden. 60

14. Datenspeichersystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung so implementiert ist, dass die digitalen Daten in parallelen Kanälen 65

codiert werden und gleichzeitig in das Speichermedium eingeschrieben werden.

15. Datenspeichersystem nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Fehlerkorrektur- und Aufnahmecodierung so implementiert werden, dass die digitalen Daten in parallelen Kanälen codiert und nacheinander in das Speichermedium eingeschrieben werden.

16. Datenspeichersystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass durch Entfernen oder Verdecken der reflektierenden Einheit die in das Speichermedium eingeschriebenen Daten ausgelesen werden können, indem der von den Gittern reflektierte Strahl detektiert wird.

17. Datenspeichersystem nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die in das Speichermedium eingeschriebenen Daten dergestalt ausgelesen werden, dass die Kanten der streifenförmigen Gitter als binäre Einsen und die Länge des Gitters zwischen zwei Kanten als die Zahl der Nullstellen decodiert wird.

18. Datenspeichersystem nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere streifenförmige Mikrogitter, die mit verschiedenen Wellenlängen räumlich überlappend in das Speichermedium eingeschrieben wurden separat mit den entsprechenden Wellenlängen nacheinander ausgelesen werden.

19. Datenspeichersystem nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Multiplexgitter nacheinander ausgelesen und in parallelen Multiplexkanälen decodiert werden.

20. Datenspeichersystem nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere streifenförmige Mikrogitter, die mit verschiedenen Wellenlängen räumlich überlappend in das Speichermedium eingeschrieben wurden separat mit den entsprechenden Wellenlängen gleichzeitig ausgelesen werden.

21. Datenspeichersystem nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Multiplexgitter gleichzeitig ausgelesen und in parallelen Multiplexkanälen decodiert werden.

22. Datenspeichersystem zum Einschreiben von Daten in ein Speichermedium gekennzeichnet durch die Vereinigung folgender Merkmale:  
Einen Schreib- und Lese Multiwellenlängenkopf, der durch Kollimierung mehrerer modenstabilisierter Diodenlaser einen kohärenten Laserstrahl, der aus mehreren diskreten Wellenlängen besteht, liefert.  
Ein in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls positionierbares Objektiv, das den Multiwellenlängenstrahl in ein holographisches Speichermedium fokussiert.  
Einen Schreibkopf, der eine reflektierende Einheit beinhaltet und den einfallenden Laserstrahl exakt in sich zurückbildet, wobei die reflektierende Einheit in Ausbreitungsrichtung des Multiwellenlängenstrahls positionierbar ist.  
Ein holographisches Speichermedium, das über ein Mittel räumlich relativ zum Laserstrahl verschiebbar ist.

23. Datenspeichersystem nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Position des Objektivs und der reflektierenden Einheit mit einem Servosystem geregelt wird.

24. Datenspeichersystem nach Anspruch 22 oder 23, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl gleichzeitig zum Schreiben der Information und zur automatischen Fokusregelung und Positionierung des Objektivs und der reflektierenden Einheit verwendet wird.

25. Datenspeichersystem nach Anspruch 24, dadurch

gekennzeichnet, dass für die automatische Fokusregelung und Positionierung zuerst eine im Speichermedium vorhandene Führungsspur und anschließend eine geschriebene Gitter als Referenz genutzt werden.

26. Datenspeichersystem nach einem der Ansprüche 5  
22 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass durch Entfernen oder Verdecken der reflektierenden Einheit die in das Speichermedium eingeschriebenen Daten ausgelesen werden können, indem der von den Gittern reflektierte Strahl detektiert wird und der Laserstrahl gleichzeitig zum Lesen der Information und zur automatischen Fokusregelung und Positionierung des Objektivs verwendet wird, indem die in Spuren eingeschriebenen Mikrogitter als Referenz genutzt werden.

27. Datenspeichersystem nach Anspruch 22 oder 23, 15  
dadurch gekennzeichnet, dass ein Pilotlaser mit Emissionswellenlänge außerhalb des Sensitivitätsbereichs des Speichermaterials zur automatischen Fokusregelung und Positionierung optischer Komponenten verwendet wird, indem der Fokus des Pilotstrahls fest in 20 einer vorformatierten Führungsspur des Speichermediums gehalten wird.

28. Datenspeichersystem nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass ein Pilotlaser mit Emissionswellenlänge außerhalb des Sensitivitätsbereichs des Speichermaterials zur Positionierung des Fokus des Schreibstrahls in der Tiefe der photoempfindlichen Speicherschicht beim Tiefenmultiplexing verwendet wird, indem der Abstand zwischen dem Pilotstrahlfokus und Schreibstrahlfokus durch die Veränderung der 30 Divergenz des Pilotstrahls definiert variiert wird.

29. Datenspeichersystem nach einem der Ansprüche 22 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass die chromatische Aberration des Objektivs ausgenutzt wird, um Gitter mit Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge in 35 unterschiedliche Ebenen des Speichermediums zu fokussieren und einzuschreiben.

30. Datenspeichersystem nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, dass die Gitter in mehreren Ebenen in das Speichermedium geschrieben werden und diese 40 Ebenen ihrerseits durch Ausnutzen der chromatischen Aberration in Ebenen aufgeteilt werden.

31. Verfahren zum Einschreiben von Daten in ein Speichermedium, wobei das Speichermedium mindestens einen Bereich aufweist, in dem durch zwei sich in 45 diesem Bereich kohärent überlagernde Strahlen Gitter in das Speichermedium einschreibbar sind und das Speichermedium relativ zu den beiden sich kohärent überlagernden Strahlen bewegbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass das Speichermedium während des Einschreibens relativ zu den sich im Speichermedium überlagernden kohärenten Strahlen bewegt wird.

---

Hierzu 15 Seite(n) Zeichnungen

**-Leerseite-**

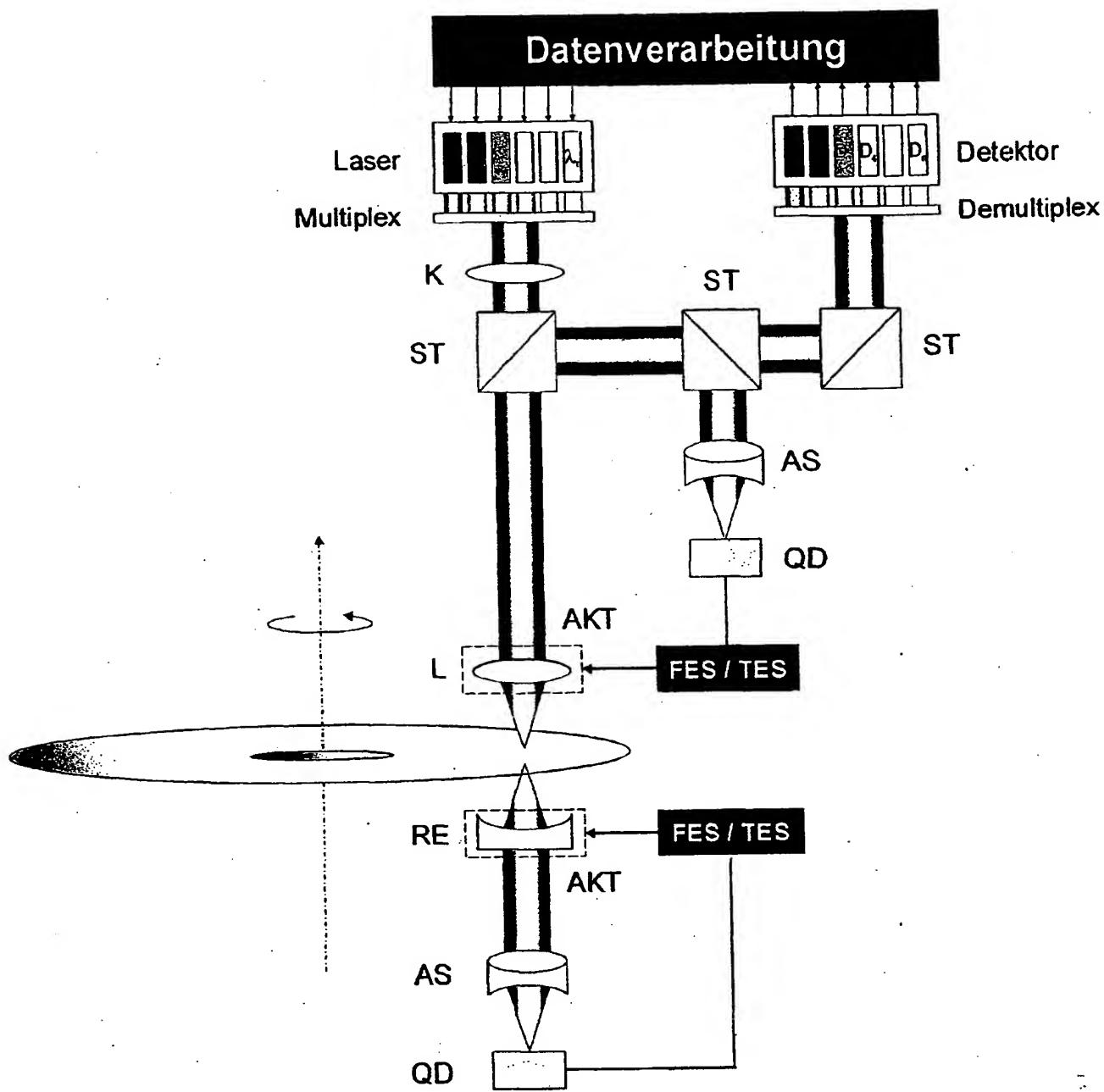


Bild 1

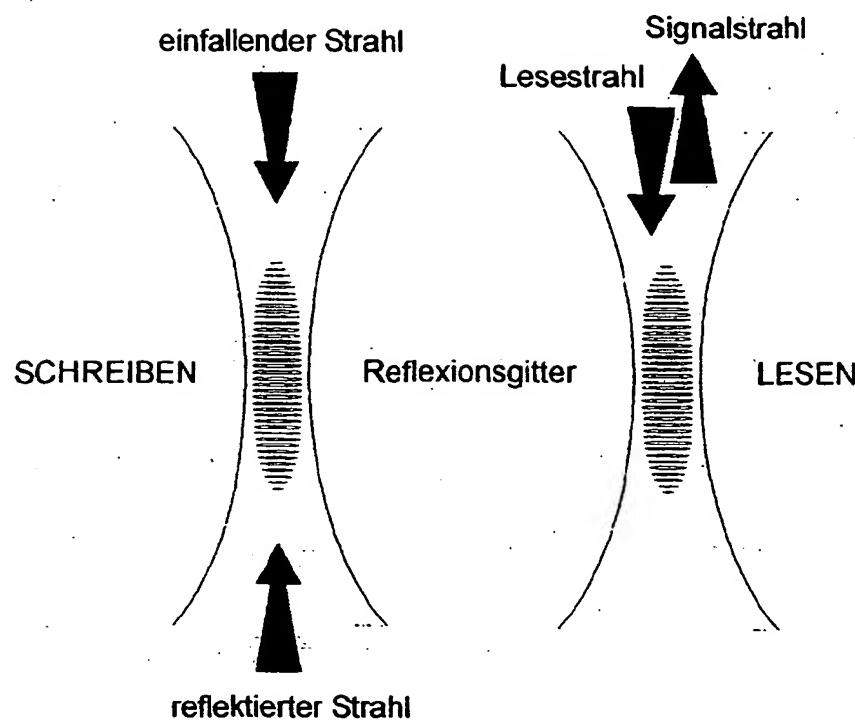


Bild 2

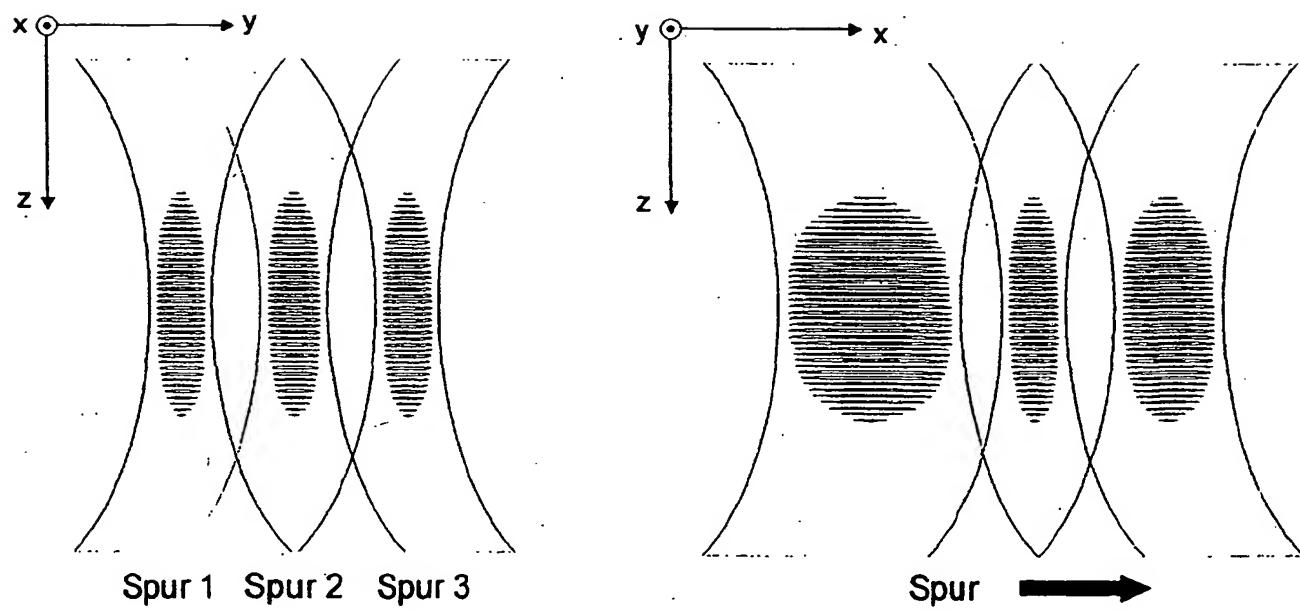


Bild 3

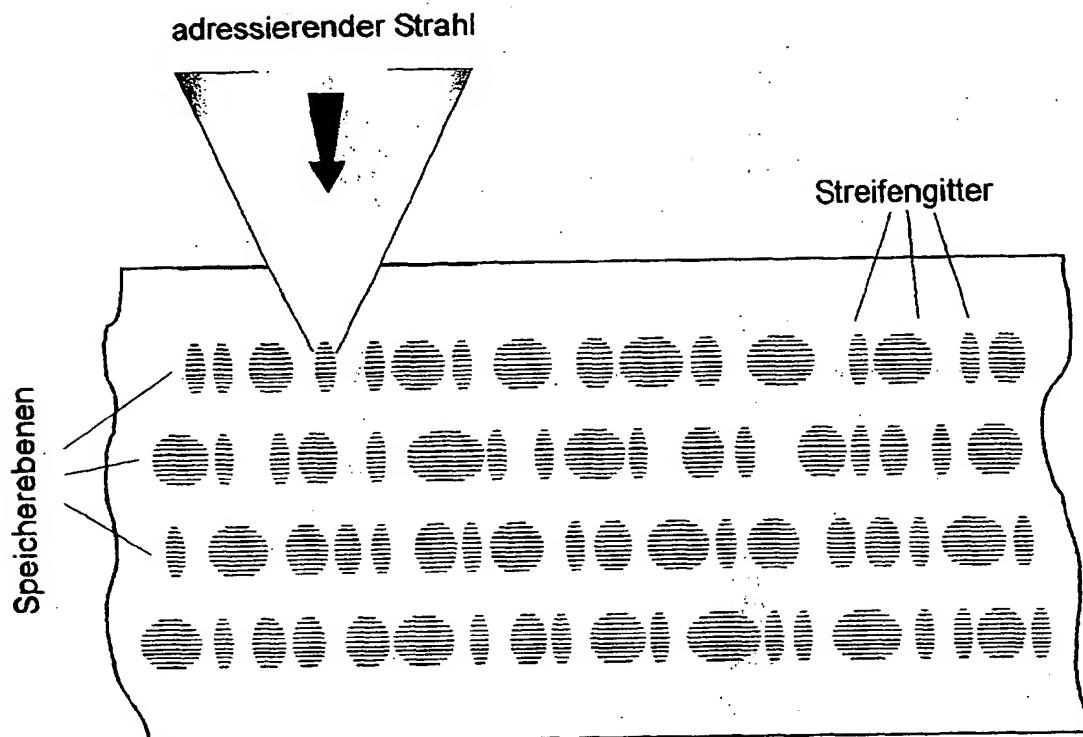


Bild 4

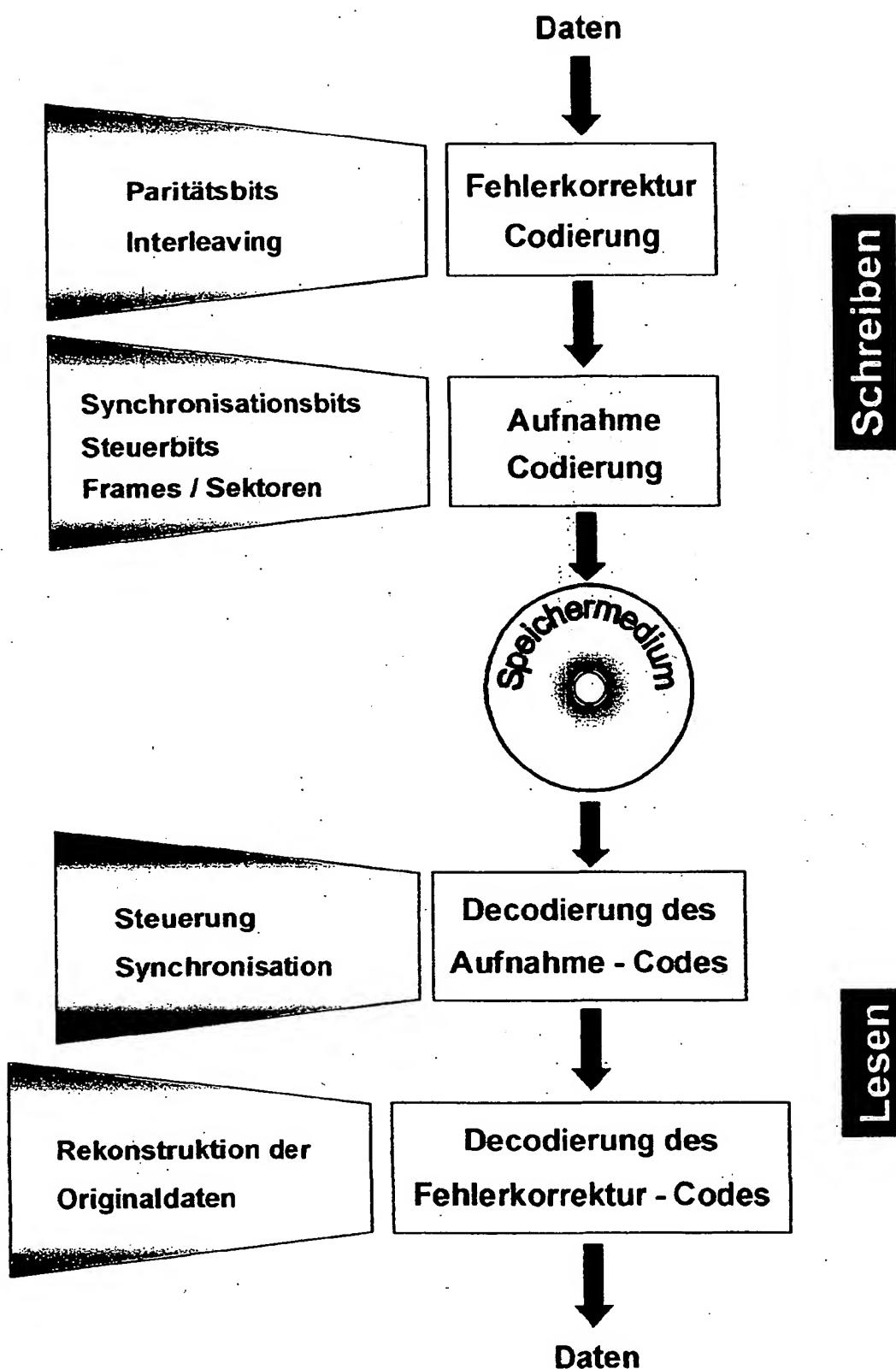


Bild 5

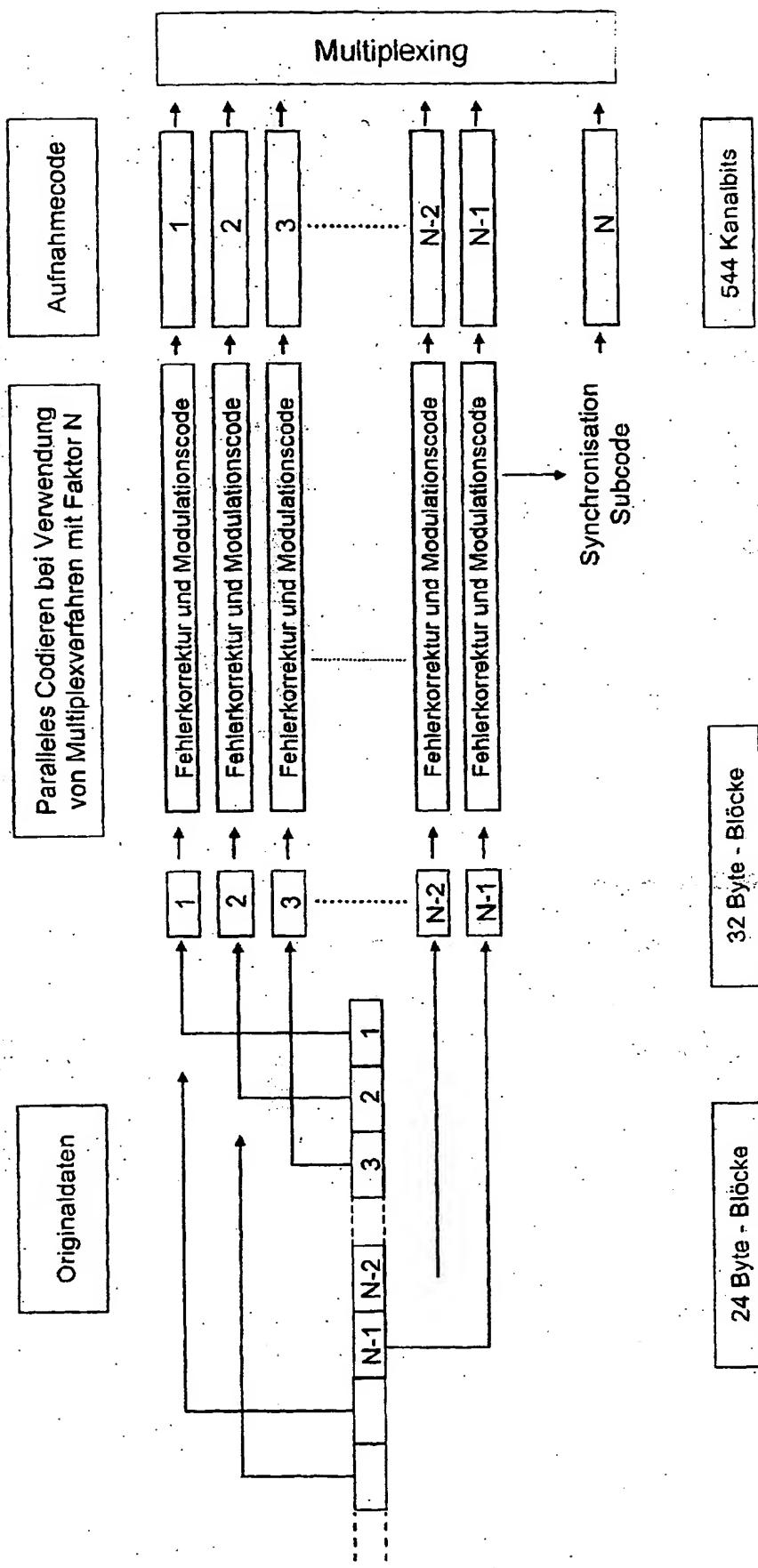


Bild 6

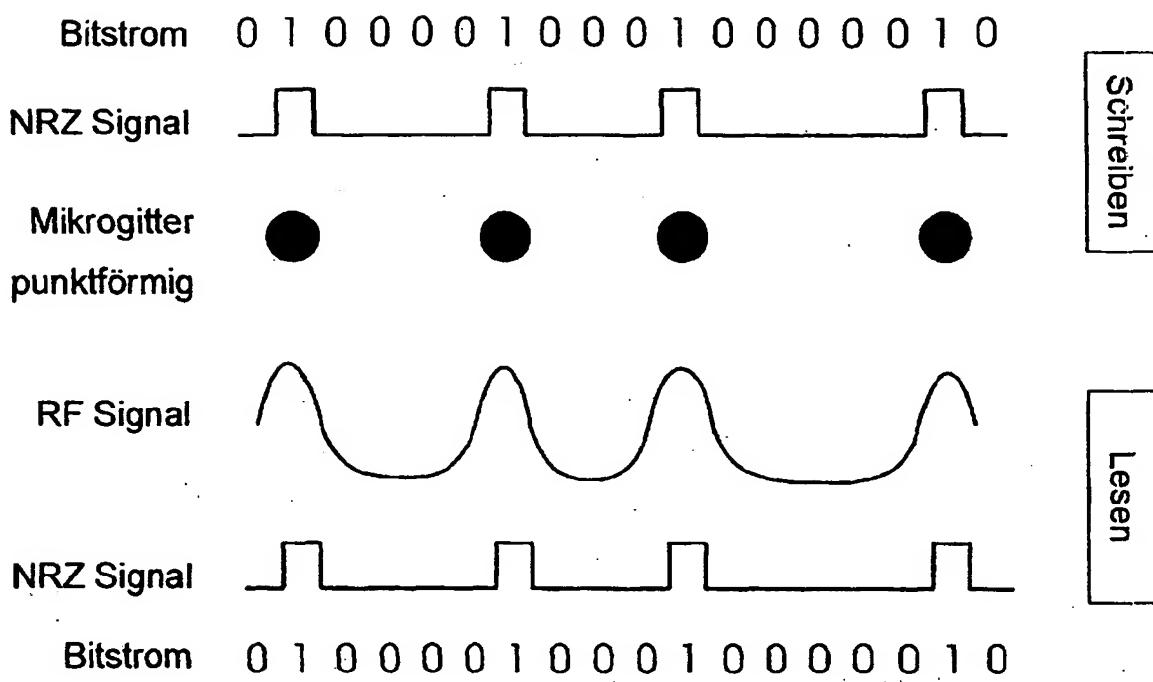


Bild 7a

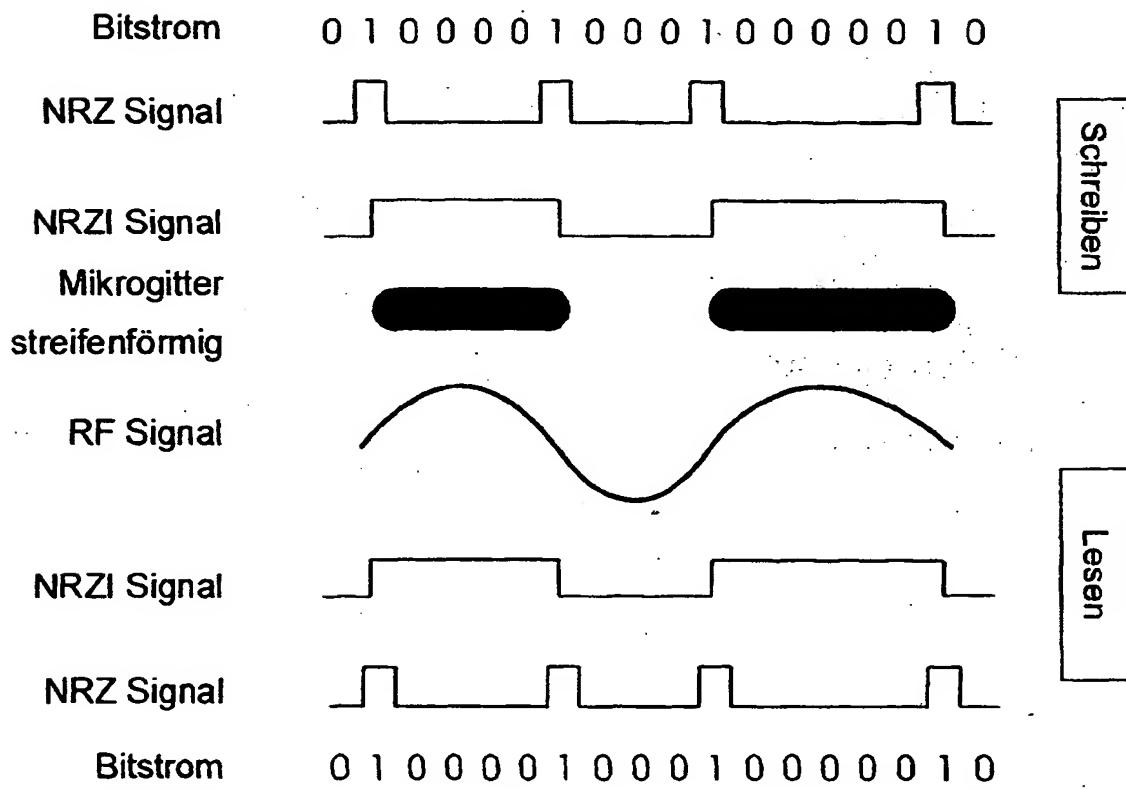


Bild 7b

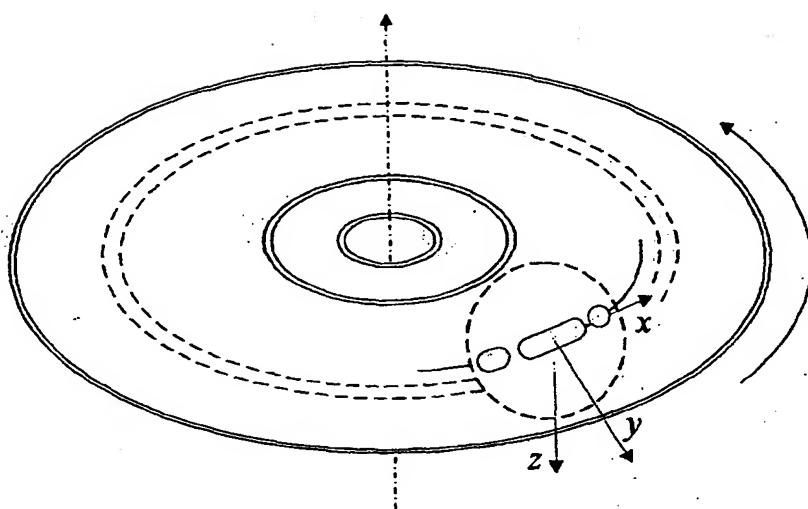


Bild 8a

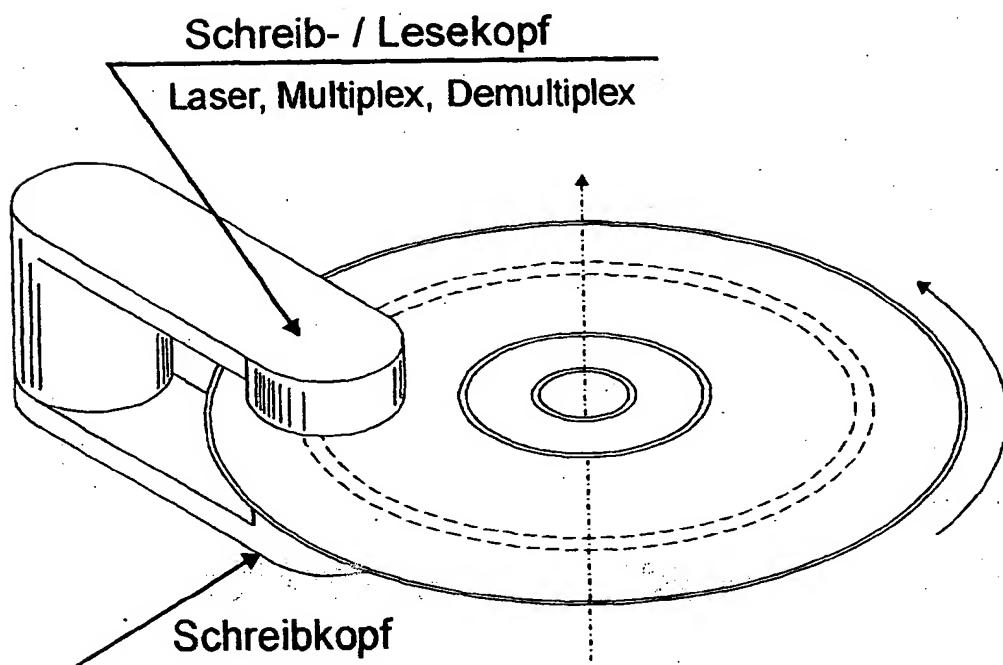


Bild 8b

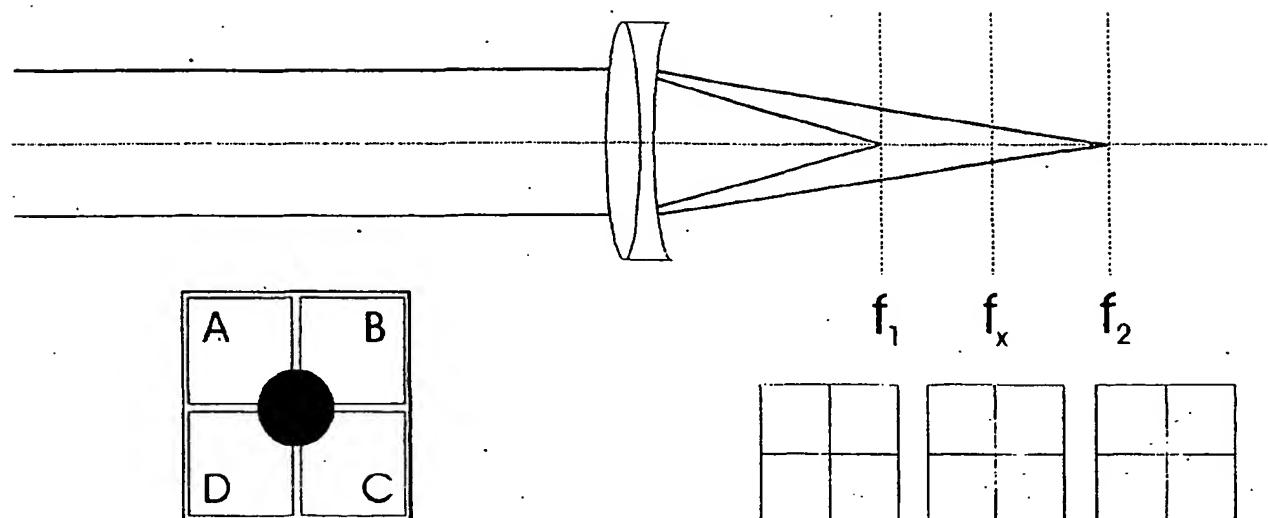


Bild 9

100

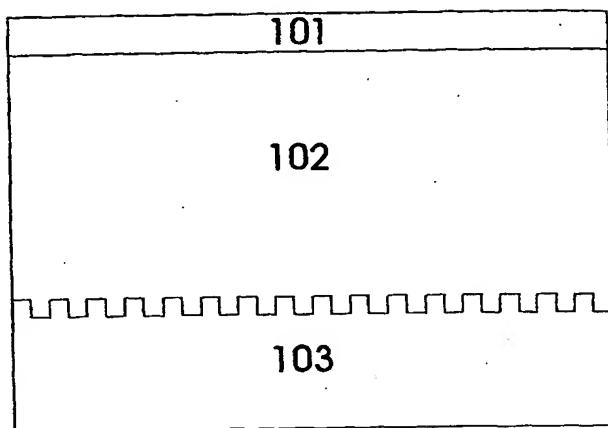


Bild 10

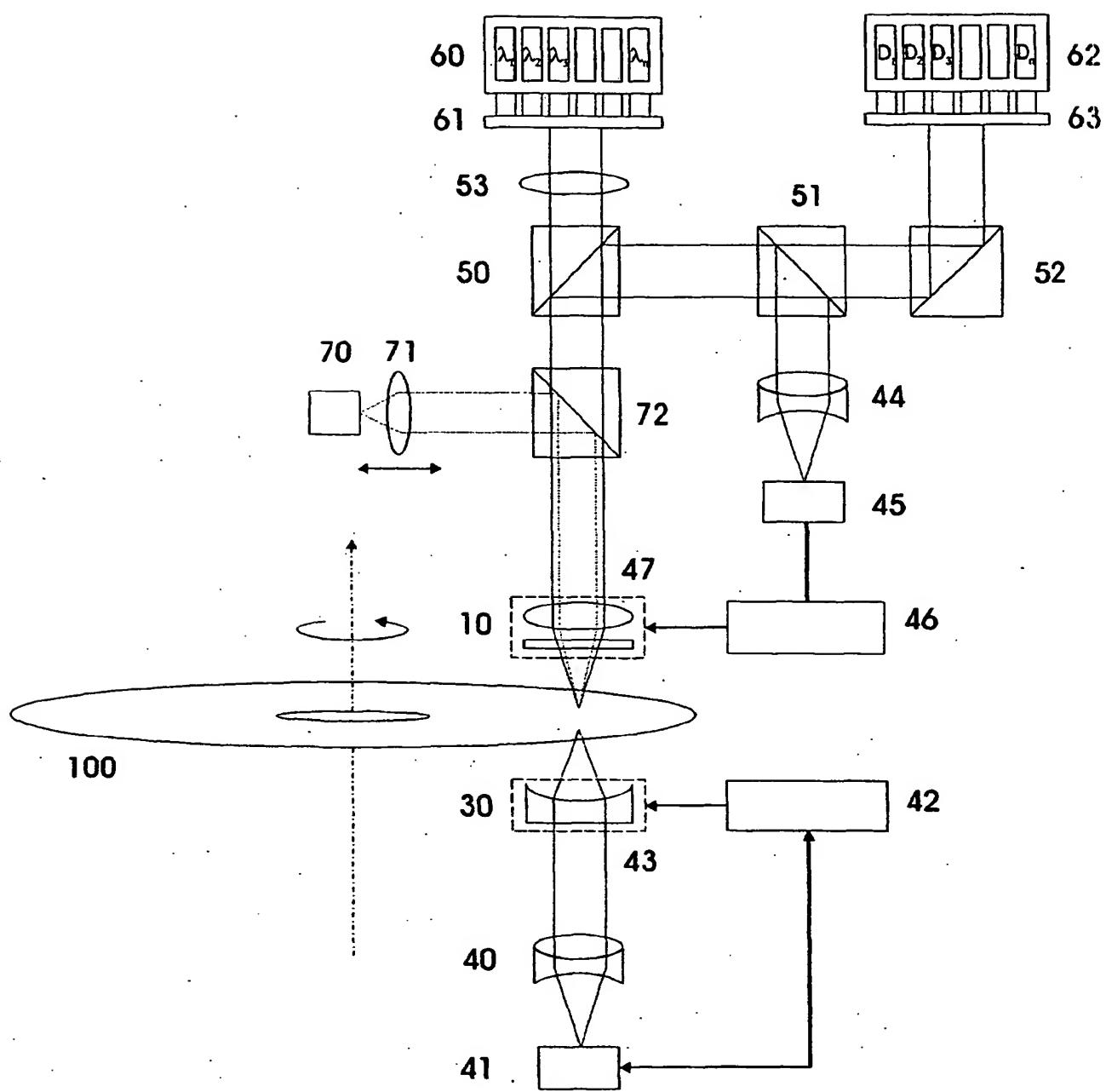


Bild 11

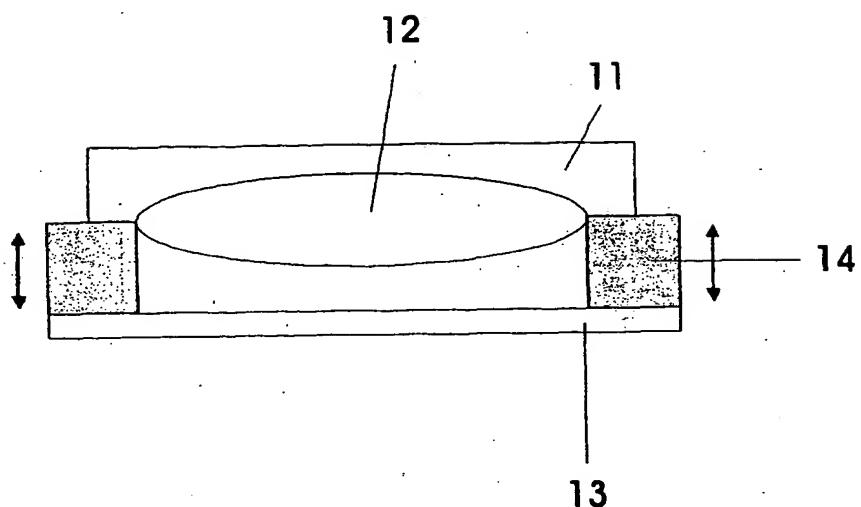


Bild 12

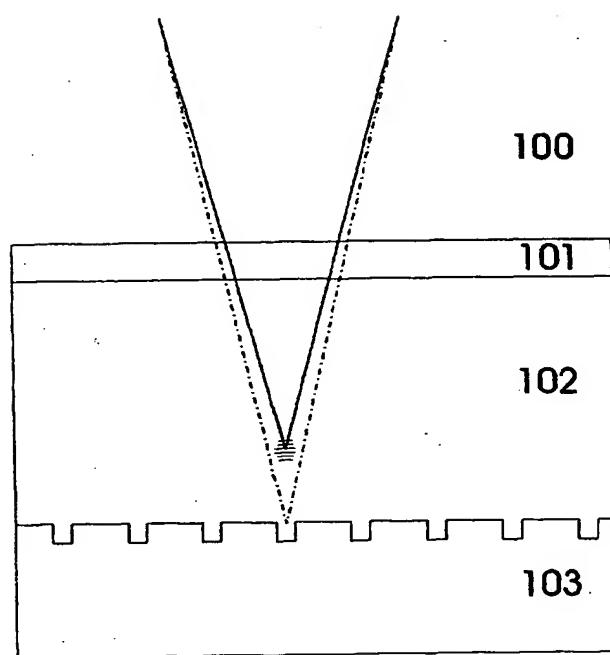


Bild 13

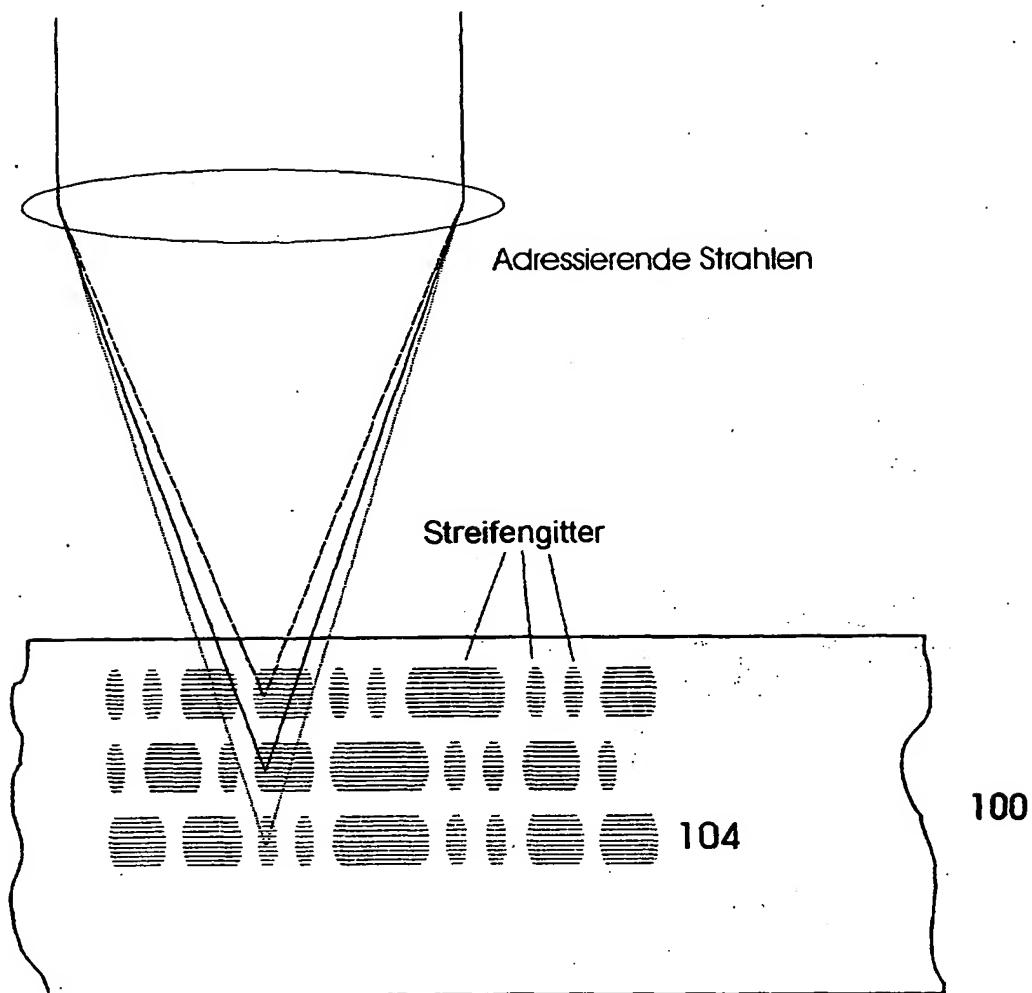


Bild 14

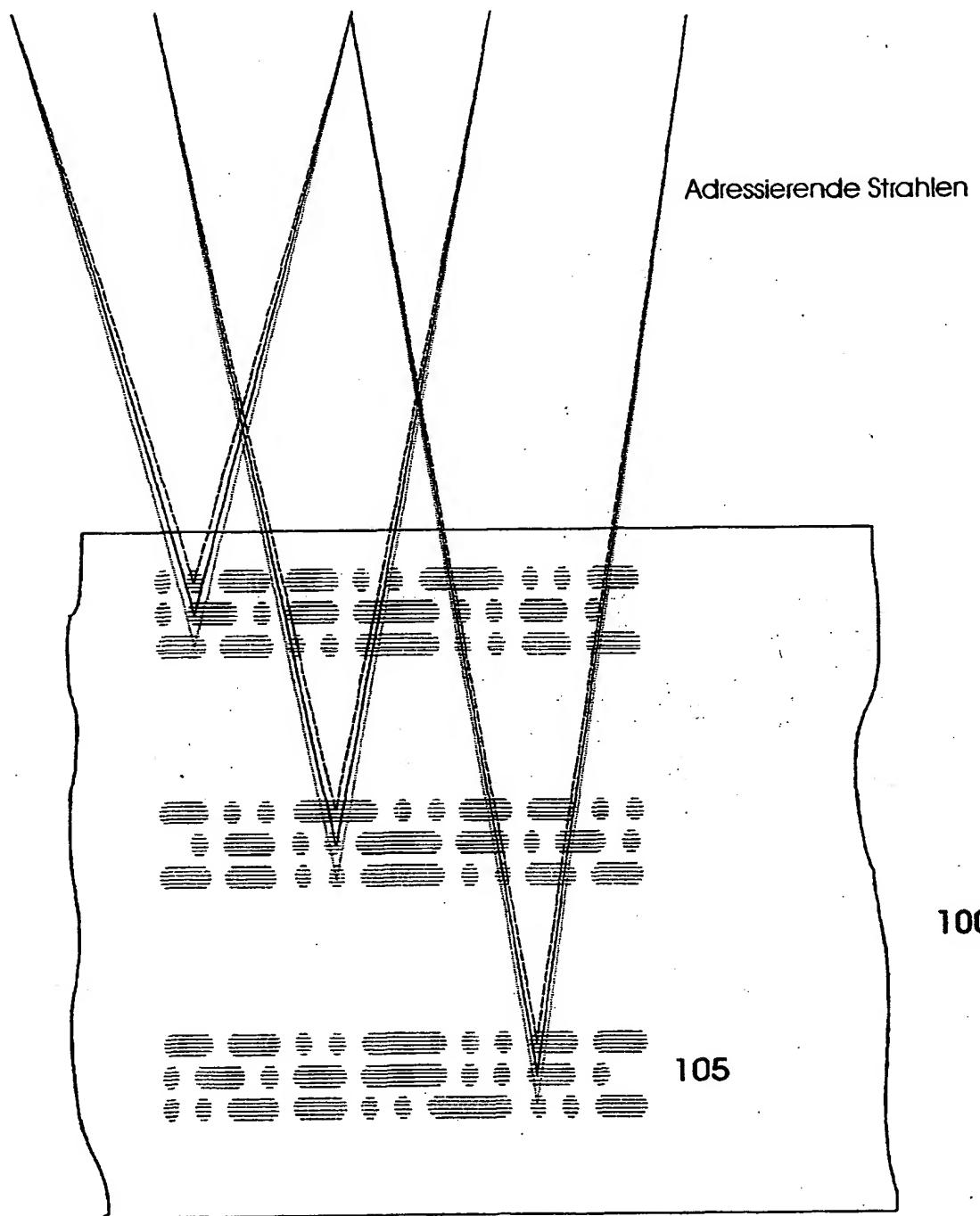


Bild 15

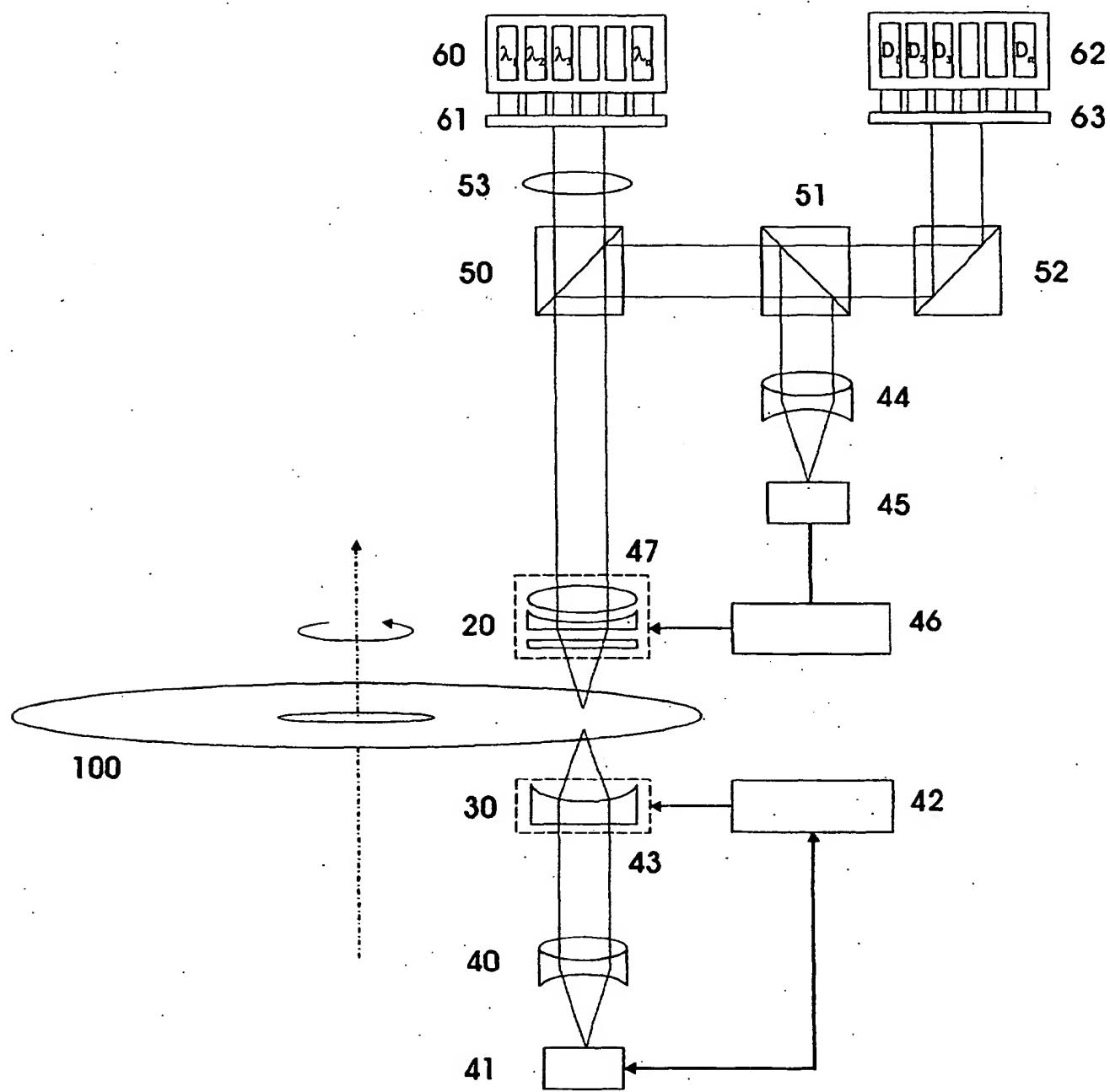


Bild 16

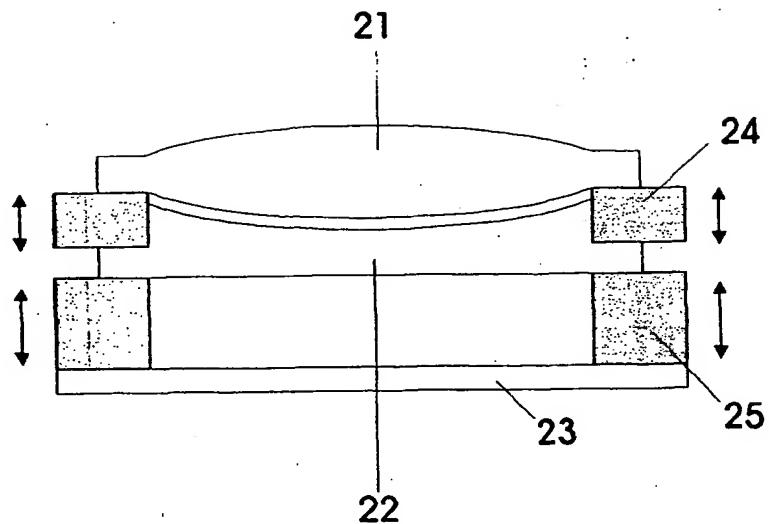


Bild 17

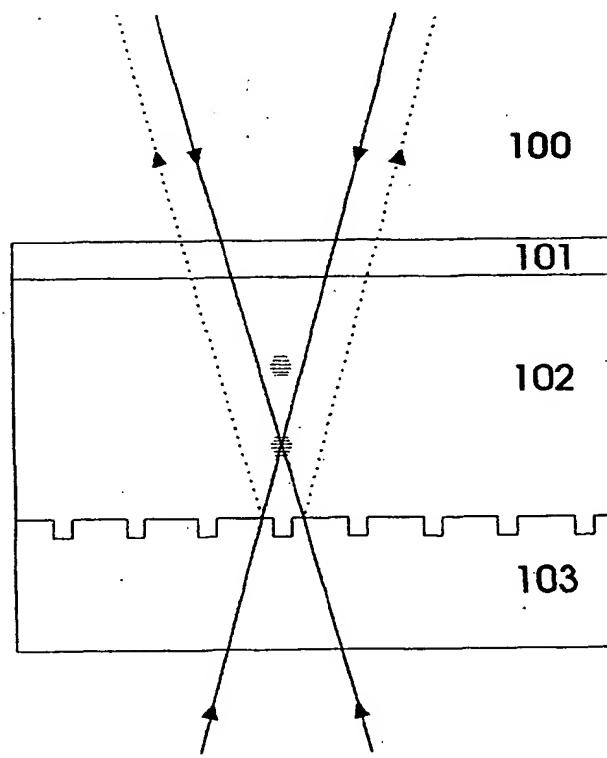


Bild 18